

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

BEATRIZ DA ROCHA FELIX

**TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS PARA O
BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO**

SÃO CARLOS -SP
2025

BEATRIZ DA ROCHA FELIX

TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS PARA O BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Rodrigo Béttega

São Carlos-SP
2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas
Departamento de Engenharia Química

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Conclusão de Curso do candidato Beatriz da Rocha Felix, realizada em 14/02/2025:

Prof. Dr. Rodrigo Béttega
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Thiago Faggion de Pádua
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. João Paulo Silva Queiroz
Universidade Federal de São Carlos

AGRADECIMENTO

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho de conclusão de curso.

Primeiramente, agradeço ao meu professor orientador, Rodrigo Béttega, por sua orientação incansável, conhecimento compartilhado e paciência ao longo de todo o processo. Sua expertise e dedicação foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha mãe e minha irmã, meu mais sincero agradecimento por me apoiarem em todas as minhas decisões e por estarem ao meu lado durante toda a minha trajetória acadêmica. Vocês foram minhas maiores incentivadoras, sempre acreditando em mim e oferecendo amor e suporte incondicional. Suas palavras de encorajamento, sacrifícios e o apoio constante foram essenciais para que eu pudesse superar os desafios e alcançar meus objetivos.

Ao meu pai, agradeço por sua orientação constante e por sempre estar por perto, oferecendo conselhos valiosos e suporte. Sua presença e palavras de sabedoria foram importantes para me guiar nos momentos de dúvida.

Aos meus amigos, expresso minha gratidão por estarem sempre ao meu lado, me apoiando e ajudando em todos os momentos. Suas companhias e incentivos foram fundamentais para que eu pudesse seguir em frente com confiança e determinação.

A todos vocês, meu muito obrigado. Este trabalho é fruto do esforço e dedicação de cada um que, de alguma forma, contribuiu para a minha formação e sucesso.

RESUMO

Entre os diversos produtos da mineração, o minério de ferro é de extrema relevância para a economia global, principalmente por ser a principal fonte de ferro metálico utilizado na fabricação de aço. Este material é essencial em setores como construção civil, indústria automotiva, fabricação de maquinários e aplicações de engenharia. A extração de ferro demanda investimentos significativos em equipamentos e infraestrutura, incluindo maquinário pesado, caminhões, ferrovias e navios graneleiros. A competitividade neste setor está intimamente ligada aos custos de produção e à qualidade da matéria-prima. Atualmente, o desaguamento é uma prática muito utilizada pela indústria de mineração, para o beneficiamento do minério, antes do processamento e transporte do material, devido ao menor custo de processo e na eficiência remoção de água de produtos com alto teor de umidade. Porém, devido aos desgastes mecânicos desse processo, isso pode significar altos custos com manutenção e substituição de peças, além de um consumo alto de energia e uma grande geração de resíduos, devido ao desaguamento do minério. Dessa forma, a implementação de novas tecnologias de secagem se torna necessária, não apenas por fortalecer a competitividade da mineração de ferro, mas também por promover práticas mais sustentáveis na indústria. Nesse contexto, para a elaboração do presente trabalho foi estudado novas tecnologias de metais pesados e indicar os equipamentos e processos mais viáveis para a aplicação no contexto de secagem de minério de ferro, através da revisão bibliográfica de artigos e revistas científicas do meio.

Palavras-chave: Minério de ferro; Novas tecnologias; Secagem; Umidade; Secador rotativo.

ABSTRACT

Among the various mining products, iron ore holds significant importance for the global economy, primarily as the main source of metallic iron used in steel production. This material is essential in sectors such as construction, the automotive industry, machinery manufacturing, and engineering applications. Iron extraction requires substantial investments in equipment and infrastructure, including heavy machinery, trucks, railways, and bulk carriers. Competitiveness in this sector is closely linked to production costs and the quality of the raw material. Currently, dewatering is widely used in the mining industry for ore beneficiation before processing and transportation due to its lower processing costs and efficiency in removing water from high-moisture materials. However, the mechanical wear associated with this process can lead to high maintenance and replacement costs, as well as significant energy consumption and considerable waste generation due to ore dewatering. Therefore, the implementation of new drying technologies becomes necessary not only to strengthen the competitiveness of iron mining but also to promote more sustainable practices within the industry. In this context, this study explores new heavy metal technologies and identifies the most viable equipment and processes for application in iron ore drying, based on a literature review of scientific articles and journals in the field.

Keywords: Iron ore; New technologies; Drying. Moisture; Rotary dryer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - METODOLOGIA UTILIZADA NO TRABALHO.	20
FIGURA 2 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO TRADICIONAL DE BENEFICIAMENTO E SECAGEM DO MINÉRIO DE FERRO.	23
FIGURA 3 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO A SECO.	24
FIGURA 4 - COMPARAÇÃO DO BENEFICIAMENTO A ÚMIDO COM O BENEFICIAMENTO A SECO UTILIZADO PELO COMPLEXO S11D DA VALE S.A.	25
FIGURA 5 - PROCESSO DE PREPARAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO.	26
FIGURA 6 - PROCESSO DE REDUÇÃO DO MINÉRIO POR GRELHA RETA.	28
FIGURA 7 - PROCESSO DE REDUÇÃO DO MINÉRIO POR FORNO ROTATIVO.	28
FIGURA 8 - PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO PELA VALE DOS CARAJÁS.	30
FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DETALHADO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO PELO VALE DOS CARAJÁS.	30
FIGURA 10 - PROCESSO DE BENEFICIAMENTO ÚMIDO DA PLANTA DE NOAMUNDI, TATA STEEL LTDA.	32
FIGURA 11 - PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DAS MINAS DE FERRO JODA, TATA STEEL LTDA.	33
FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE BAIXA QUALIDADE DA TATA STEEL MINERALS CANADA.	35
FIGURA 13 - TECNOLOGIAS DE DESAGUAMENTO MINERAL.	39
FIGURA 14 - CLASSIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS PELA INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO.	42
FIGURA 15 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO POR SEPARAÇÃO MAGNÉTICA.	42
FIGURA 16 - TESTE PILOTO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO POR SEPARAÇÃO MAGNÉTICA.	43
FIGURA 17 - RESULTADOS DE (A) RENDIMENTO DO CONCENTRADO (B) GRAU DO CONCENTRADO (C) RECUPERAÇÃO DO CONCENTRADO.	44
FIGURA 18 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO MODELO DINÂMICO PARA A PLANTA DE BENEFICIAMENTO SOLAR-TÉRMICO PROPOSTA PELO ESTUDO.	46
FIGURA 19 - MODELO DO PROCESSO SIMULADO NO ASPEN PLUS.	46
FIGURA 20 - UMIDADE DE DUAS AMOSTRAS DE MINÉRIO EM FUNÇÃO DA PASSAGEM POR CÂMARAS.	47
FIGURA 21 - EFEITO DA POTÊNCIA DAS MICROONDAS EM RELAÇÃO DE UMIDADE VERSUS TEMPO, E DIFERENTES CONDIÇÕES DE TAMANHO DO PELLET E DENSIDADE DE POTÊNCIA.	50
FIGURA 22 - COMPARAÇÃO ENTRE TAXA DE SECAGEM PELA UMIDADE DA AMOSTRA DE SECAGEM CONVENCIONAL E SECAGEM POR MICRO-ONDAS.	51
FIGURA 23 - ESQUEMA DO EQUIPAMENTO E PROCESSO DE SECAGEM.	52
FIGURA 24 - EQUIPAMENTO DE SECAGEM UTILIZADO JUNTAMENTE COM O SHF.	54
FIGURA 25 - UMIDADE DA AMOSTRA EM FUNÇÃO DO TEMPO.	54
FIGURA 26 - FUNCIONAMENTO DO CHUTE DE SECAGEM.	56

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CONSUMO ENERGÉTICO DA MINERAÇÃO E PELOTIZAÇÃO.....	18
TABELA 2 - PRINCIPAIS ETAPAS DO BENEFICIAMENTO À SECO	24
TABELA 3 - DIFERENÇAS DE CLASSIFICAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO DE ACORDO COM O TAMANHO DA PARTÍCULA DO PRODUTO.	26
TABELA 4 - PANORAMA DAS TECNOLOGIAS DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO UTILIZADA POR DIFERENTES INDÚSTRIAS.	36
TABELA 5 - TRABALHOS DESENVOLVIDOS SOBRE O BENEFICIAMENTO TÉRMICO DO MINÉRIO DE FERRO.	40
TABELA 6 - TRABALHOS AVALIADOS PARA SECAGEM EM PELOTAS E MINÉRIO CONCENTRADO.	48

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras gregas

λ Ferro atomizado

Abreviaturas e Siglas

CAPES Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CFD Computational Fluid Dynamics

GEE Gases do Efeito Estufa

IBRAM Instituto Brasileiro de Mineração

JSPL Jindal Steel & Powel Ltd

LCOD Levelized Cost of Driving Assumptions

LKAB Lussovaara-Kiirunavaara Aktiebolag

ROM Run-of-mine

SHF Super High Frequency

TSMC Taiwan Semiconductor Manufacturing Company

WHIMS Wet High Intensity Magnetic Separator

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. Contextualização.....	16
1.3. Objetivo do trabalho	19
1.4. Justificativa	19
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
3. PROCESSO BENEFICIAMENTO E SECAGEM DO MINÉRIO DE FERRO NA INDÚSTRIA.....	21
3.1. Processo de beneficiamento de minério de ferro	21
3.1.1. Beneficiamento úmido	22
3.1.2. Beneficiamento a seco	23
3.2. Processo de pelletização e sinterização do minério de ferro	25
4. Processamento mineral no mundo e suas características principais.....	29
4.1. Minério de alta qualidade.....	29
4.1.1. Beneficiamento a úmido	29
4.1.2. Beneficiamento a seco	32
4.2. Minério de baixa qualidade.....	33
5. BENEFICIAMENTO TÉRMICO E SECAGEM DO MINÉRIO DE FERRO	38
5.1. Novas tecnologias para beneficiamento térmico do minério de ferro.	40
5.1.1. Processamento Mineral a Seco: Testes em Laboratório com Minério de Ferro de Depósito no Sudoeste do Quadrilátero Ferrífero.....	41
5.1.2. Beneficiamento de minério de ferro particulado grosso usando um separador de leito fluidizado baseado em densidade seca	43
5.1.3. Beneficiamento solar do minério de ferro	45
5.2. Novas tecnologias para secagem do minério de ferro	48
5.2.1. Secagem por Micro-ondas	48
5.2.2. Secador de tambor utilizando tecnologia multiagente.....	52
5.2.3. Secagem de Pelotas de Minério de Ferro por Aquecimento de Super Alta Frequência (SHF)	53
5.2.4. Secagem convectiva por chute de transferência	55
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
REFERÊNCIAS.....	60

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

A indústria de mineração de ferro desempenha um papel crucial na economia global, sendo um dos principais fornecedores de matéria-prima para diversas indústrias, como a de aço. No entanto, esse setor enfrenta desafios significativos relacionados à eficiência operacional, sustentabilidade ambiental e a necessidade de inovação tecnológica. A remoção de água do minério de ferro é uma etapa essencial no processamento mineral, pois influencia a qualidade do produto, a logística e os custos de produção. Com o aumento das regulamentações ambientais e a crescente pressão para reduzir a pegada de carbono, a adoção de tecnologias de secagem mais eficientes e sustentáveis se torna imperativa.

Nos últimos anos, diversas inovações tecnológicas têm emergido, prometendo melhorias na eficiência energética, na redução de custos e no impacto ambiental das operações de deságue. Contudo, a implementação dessas tecnologias requer uma análise cuidadosa de sua viabilidade, considerando o contexto específico da indústria de mineração, que é caracterizada por suas particularidades operacionais e econômicas. Assim, este trabalho se propõe a investigar as novas tecnologias de beneficiamento e secagem aplicáveis ao minério de ferro, avaliando não apenas suas vantagens e desvantagens, mas também sua adequação às necessidades do setor.

O Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) divulgou recentemente os dados de desempenho do setor mineral brasileiro para o primeiro trimestre de 2024. De acordo com o relatório, o setor registrou um faturamento de R\$ 68 bilhões, representando um crescimento de 25% em relação ao mesmo período do ano anterior. O minério de ferro destacou-se como o principal produto, contribuindo com 64,2% do faturamento total, o que equivale a R\$ 43,9 bilhões (IBRAM, 2024).

As exportações do setor mineral também apresentaram crescimento significativo. A receita com as exportações alcançou US\$ 10,8 bilhões, com um volume total de 87,5 milhões de toneladas. Esses números representam aumentos de 18,3% em receita e 11,3% em volume na comparação com o primeiro trimestre de 2023 (IBRAM, 2024).

Especificamente, as vendas externas de minério de ferro somaram US\$ 8,1 bilhões até março de 2024, uma elevação de 11,9% em comparação com o mesmo período do ano anterior. Em termos de volume, as exportações de minério de ferro totalizaram 84,1 milhões

de toneladas, das quais o minério de ferro representou 74,4%. Os demais produtos que se destacaram foram o ouro, com uma participação de 7,4%, e o cobre, com 6,9% (IBRAM, 2024).

Esses dados indicam a relevância contínua do minério de ferro para a economia brasileira, não apenas em termos de faturamento, mas também como um dos principais produtos de exportação. O crescimento expressivo nas vendas externas reflete a demanda global por este recurso e a capacidade do Brasil de atender a essa demanda com eficiência.

A oferta de minério de ferro no Brasil está fortemente associada à sua distribuição geológica, com exploração concentrada em três principais regiões. O Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais abriga mais da metade dos depósitos do país, destacando-se na produção de minério de ferro e manganês. O Maciço do Urucum no Mato Grosso do Sul contribui com menores quantidades de ambos os minerais. A Serra dos Carajás no Pará, reconhecida como a maior província mineral do mundo, é rica em minério de ferro, níquel, cobre, entre outros (Carneiro, 2017).

Através de uma revisão abrangente da literatura científica, buscou-se elucidar as tendências atuais e contribuir para um entendimento mais profundo das possibilidades de inovação na mineração, indicando possibilidades práticas mais eficientes e sustentáveis.

1.2. Histórico e evolução

A retirada de umidade do minério de ferro é uma etapa crucial no processo de beneficiamento mineral, essencial para a preparação do minério para o transporte e subsequente processamento. No Brasil, a evolução das tecnologias de secagem do minério de ferro reflete o desenvolvimento da indústria de mineração ao longo dos anos, respondendo às necessidades de eficiência, sustentabilidade e competitividade.

O início da mineração de ferro no Brasil remonta ao final do século XIX e início do século XX, quando as primeiras minas começaram a ser exploradas em regiões como o Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. Nessa época, os métodos de secagem eram rudimentares e baseados principalmente na exposição ao sol e ao ar, práticas que dependiam muito das condições climáticas e ofereciam baixa eficiência (Azevedo, et. al., 2010)

Com o avanço da industrialização e o aumento da demanda por minério de ferro, especialmente durante e após a Segunda Guerra Mundial, houve a necessidade de métodos mais eficientes e controláveis. Foi então que tecnologias para o beneficiamento do minério de ferro começaram ser desenvolvidas para etapas de cominuição, classificação, concentração

gravítica, que ainda são as principais etapas de beneficiamento do minério de ferro, como mostrado na Figura 2.

Para a etapa de cominuição foram desenvolvidos equipamentos como o moinho pilão, mecanizado com máquina a vapor, britador de rolos, de mandíbulas e giratório, além do moinho de barras, moagem autógena e moinho de rolos de alta pressão. Na etapa de classificação foram desenvolvidos equipamentos como a classificação mecânica e cilone. E, para etapa de concentração, as principais tecnologias destacadas são mesa Winfley, separação em meio denso estática, ciclone de meio denso, concentrador centrífugo, entre outros. (Luz, et. al., 2010).

A necessidade de plantas de beneficiamento mais complexas na indústria mineral é cada vez mais crescente devido à diminuição do minério de alta qualidade nas jazidas, sendo essencial o aumento do teor de ferro no minério lavrado (Pereira, 2012). Ainda assim, no Brasil ainda tem-se muitas indústrias que não realizam processos de beneficiamento ou incorporam a secagem do minério em seus processos.

As indústrias que realizam o beneficiamento do minério de ferro utilizam majoritariamente, por sua vez, o deságue mecânico, o que é um grande gerador de efluentes, aumentando os debates sobre a necessidade de adoção de tecnologias mais sustentáveis.

A mineração do ferro no Brasil consumiu 8,44 TWh de energia elétrica em 2007, com um consumo médio específico de 7 kWh por tonelada de produto mineral comercializado. Apesar de não ser considerada uma atividade eletrointensiva, o grande volume de produção gera um consumo significativo de energia, com variações entre os minerais, como 2 a 3 kWh/t para pedra britada, 17 kWh/t para minério de ferro e até 40 kWh/t na pelotização. A etapa de cominuição (britagem, peneiramento e moagem) representa cerca de metade do consumo elétrico em usinas de tratamento de minérios. Embora faltem dados nacionais que separem o consumo energético entre lavra e beneficiamento, estudos dos EUA indicam uma divisão quase igual entre essas etapas (Luz et. al., 2010). Na Tabela 1, está descrito o consumo de energia elétrica na mineração e pelotização do minério de ferro.

Tabela 1 - Consumo energético da mineração e pelotização

	Energia total		Energia Elétrica		Energia Elétrica (% da energia total)
	(10^9 GJ *)	(%)	(TWh)	(%)	
1. Mineração	0,069	0,82	8,44	2,05	44

2. Pelotização	0,061	0,73	2,16	0,52	13
Total (1+2)	0,13	1,6	10,6	2,6	29
Brasil	8,4	100	412	100	18

Fonte: Adaptado de Nascimento et. al., 2010.

Em termos de emissões de CO₂, a mineração apresenta níveis relativamente baixos em comparação a outras indústrias, variando entre 1 e 7 kg de CO₂ por tonelada de minério bruto (ROM) na lavra, principalmente devido ao uso de explosivos e combustíveis no transporte. No tratamento de minérios, as emissões in situ são reduzidas devido ao uso predominante de energia elétrica, embora haja impacto indireto caso essa energia venha de fontes termoeletricas. Em relação ao uso da água, a mineração brasileira tem avançado na recirculação, com taxas que chegam a 90% em grandes operações. No entanto, ainda não há um censo hídrico nacional, o que limita o acompanhamento detalhado do consumo. A cobrança pelo uso de recursos hídricos deve impulsionar práticas mais sustentáveis, ampliando o uso racional da água em toda a indústria (Luz et. al., 2010).

1.3. Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é identificar e analisar as novas tecnologias de beneficiamento e secagem aplicáveis ao minério de ferro, avaliando sua viabilidade em termos de eficiência energética, custo-benefício e impacto ambiental. A pesquisa busca destacar as tecnologias mais adequadas para aplicação na indústria de mineração, considerando as tendências e inovações recentes. Através de uma revisão crítica da literatura científica dos últimos 10 anos, o estudo pretende fornecer uma compreensão aprofundada das opções disponíveis, contribuindo para o avanço do conhecimento na área e fazendo recomendações para futuras pesquisas e implementações práticas no setor.

1.4. Justificativa

A realização deste trabalho se justifica pela crescente necessidade da indústria de mineração de ferro em adotar práticas mais sustentáveis e eficientes em seus processos, especialmente no que diz respeito à secagem do minério. Com a demanda global por minério de ferro em alta, é fundamental que as empresas do setor busquem tecnologias que não apenas aumentem a eficiência operacional, mas também minimizem os impactos ambientais associados. O beneficiamento e a secagem do minério é um processo crítico que influencia diretamente a qualidade do produto final, os custos operacionais e a eficiência energética das

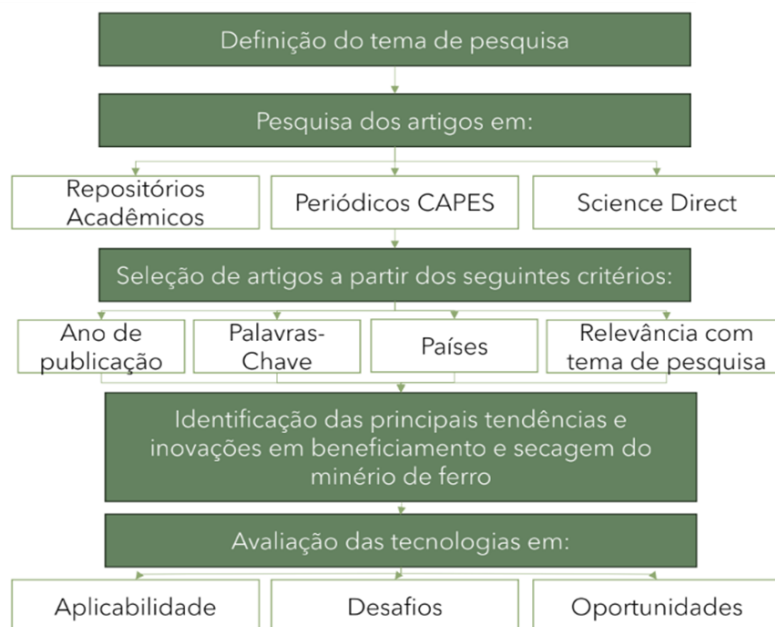
operações.

Além disso, as novas tecnologias emergentes oferecem oportunidades para reduzir o consumo de recursos e as emissões de gases de efeito estufa. Ao analisar as inovações disponíveis e suas implicações para a indústria, este trabalho visa fornecer uma base sólida para a tomada de decisão informada, contribuindo para a competitividade e sustentabilidade do setor mineral. A revisão da literatura permitiu identificar lacunas no conhecimento atual e sugerir direções para futuras pesquisas, promovendo, assim, um avanço significativo na aplicação de tecnologias de secagem no processo de produção mineral.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a elaboração deste trabalho, foram utilizados materiais bibliográficos disponíveis em bases de dados científicas, livros, artigos, revistas especializadas e publicações de conferências. O método utilizado neste trabalho foi baseado em uma revisão bibliográfica sistemática. Na Figura 1 está representada a metodologia utilizada para o desenvolvimento desse trabalho.

Figura 1 - Metodologia utilizada no trabalho.



Fonte: Autoria própria, 2025.

A partir da definição do tema de pesquisa, foi realizada uma pesquisa de artigos em repositórios acadêmicos, periódicos CAPES e science direct. Os artigos foram selecionados a

partir dos seguintes critérios: ano de publicação, palavras-chave, países de origem e relevância com o tema de pesquisa.

Foram considerados artigos publicados nos últimos 10 anos para buscar tecnologias mais recentes estudadas e desenvolvidas, além da relevância e confiabilidade das informações. As palavras chaves utilizadas foram: “*iron-ore*”, “*beneficiation*”, “*drying*”, “*new technologies*”, “*mineral industry*”, “*advances*”, entre outras. Os países procurados foram Brasil, China, Austrália e Rússia, por serem grandes potências com representatividade na indústria do minério de ferro.

A partir das pesquisas selecionadas, foram identificadas as principais tendências e inovações em beneficiamento e secagem do minério de ferro e avaliado essas tecnologias a partir de sua aplicabilidade, os desafios que essas novas tecnologias possuem e oportunidades que podem ser aplicadas. A partir do estudo, foram feitas recomendações para futuras pesquisas e possíveis implementações na indústria de mineração.

Este estudo foi limitado pela natureza da revisão bibliográfica. As conclusões e recomendações são baseadas nas informações disponíveis na literatura científica e podem necessitar de validação prática em estudos futuros.

3. PROCESSO BENEFICIAMENTO E SECAGEM DO MINÉRIO DE FERRO NA INDÚSTRIA

3.1. Processo de beneficiamento de minério de ferro

A maioria dos minérios necessita de um tratamento de beneficiamento de forma a melhorar suas propriedades físicas e químicas. O tratamento ou beneficiamento de minérios envolve a separação física ou físico-química dos minerais valiosos dos minerais não valiosos (ganga), com o objetivo de obter uma porção enriquecida chamado concentrado. Este concentrado contém a maior parte dos minerais valiosos ou apenas uma modificação na granulometria ou forma deles. Tradicionalmente, o tratamento de minério é definido como um conjunto de operações aplicadas a rochas, minérios ou minerais, com o intuito de produzir produtos que atendam às exigências do mercado, sem alterar a identidade física e/ou química dos minerais (Luz et. al., 2018).

Os principais processos de beneficiamento do minério de ferro, de acordo com o ministério de minas e energia são: fragmentação, onde o minério é fragmentado até se obter

os tamanhos relevantes para seu beneficiamento e utilização na produção do ferro; a classificação, onde as partículas são separadas de acordo com o tamanho para atender as demandas do mercado; e pôr fim a concentração, onde os minérios de interesse são separados e concentrados para utilização na indústria (Bonfim, 2017).

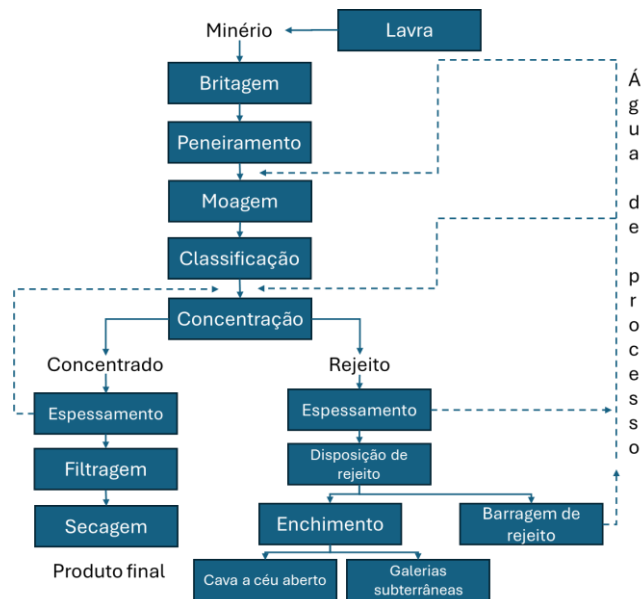
Atualmente, o minério de ferro pode ser beneficiado por separação gravimétrica, separação magnética, flotação e separação manual (por inspeção visual). Neste trabalho, iremos abordar o beneficiamento úmido, onde o minério é concentrado principalmente por desaguamento mecânico e beneficiamento a seco, onde a separação magnética é principalmente aplicada para esse fim.

3.1.1. Beneficiamento úmido

O processo de beneficiamento do minério passa por várias etapas. Primeiramente tem-se o processo de britagem e moagem do minério, reduzindo o material em partículas menores. Em seguida, um processo de peneiramento separando as partículas maiores e menores do minério além da fase de classificação por hidrociclone ou classificador espiral para separar o rejeito de mineração do concentrado.

Após isso é realizado o deságue mecânico onde o minério é decantado, um método de retirada de água não evaporativa, passado por um espessamento e filtrado em seguida. Em seguida, o minério concentrado pode passar por uma etapa de secagem convectiva, de forma a alcançar a umidade desejada para armazenamento e transporte. O rejeito também passa por desague, e a água do processo retorna para a etapa de classificação, enquanto o resto do rejeito é disposto em barragem.

Figura 2 - Fluxograma do processo tradicional de beneficiamento e secagem do minério de ferro.



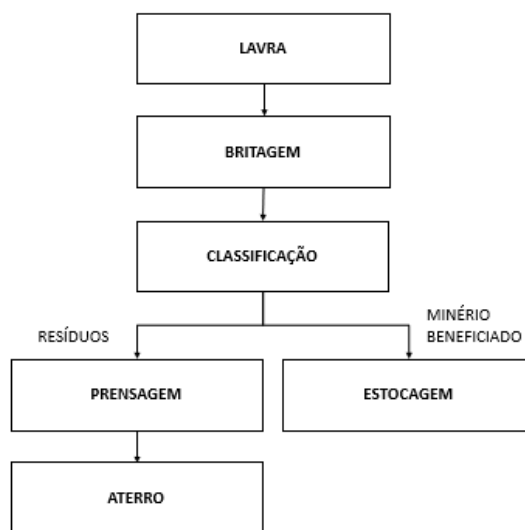
Fonte: Adaptado de Luz e Lins, 2018.

3.1.2. Beneficiamento a seco

O beneficiamento a seco é uma alternativa para a diminuição da utilização de água no processo, eliminando custos com captação, tratamento e recirculação da água, reduzindo a criação de barragens de rejeitos e sistema de drenagem e diminuindo a contaminação do solo e da água. Esse processo é utilizado principalmente em regiões áridas, com escassez de recurso hídrico e minérios com maior granulometria que possuem menor teor de umidade inicial.

No beneficiamento a seco, primeiramente, o minério é explorado na mina através de lavras que podem ser em céu aberto ou subterrâneas. A segunda etapa é a britagem do material em partículas menores e enviado em seguida para a classificação do minério. A classificação normalmente é realizada por uma sequência de peneira que separam o material por granulometria, entre *sinter feed* e *pellet feed*, como mostrado na Tabela 5. Por fim, o rejeito do minério passa por uma etapa de prensagem, utilizando o filtro prensa, onde é removida a água residual do minério e encaminhada para um aterro. O minério classificado em *pellet* e *sinter feed* é encaminhado para estocagem e depois transportado para comercialização. é quebrado e colhido e passa pela etapa de peneiramento, sendo classificado conforme sua granulometria e destinados para o mercado de acordo com sua especificidade (Nascimento, et. al., 2020). A Figura 2 apresenta um fluxograma simplificado do processo de beneficiamento a seco e a Figura 3 sumariza as principais etapas do processo.

Figura 3 - Fluxograma simplificado do processo de beneficiamento a seco.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Tabela 2 - Principais etapas do beneficiamento à seco

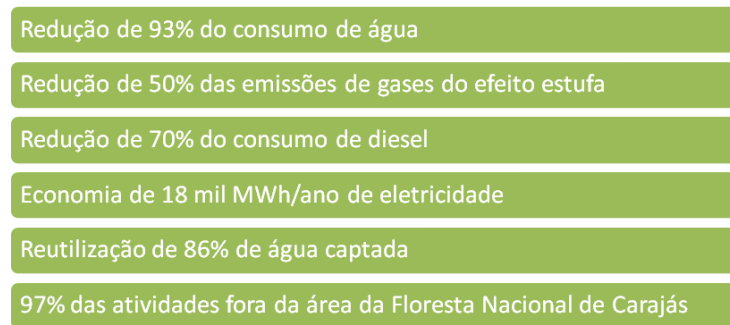
Principais etapas de beneficiamento à seco	
1. Lavra	São iniciadas as atividades de exploração da mina. Neste caso, a lavra pode ser a céu aberto ou subterrânea.
2. Extração	Com auxílio do maquinário para mineração, como por exemplo, escavadeiras e caminhões off road, o minério é extraído. Os equipamentos auxiliam na escavação, quebra de rochas, e outras atividades para tornar possível a obtenção do mineral.
3. Peneiramento	É o grande diferencial em relação ao beneficiamento com água. O material quebrado e colhido é encaminhado para usinas de processamento ou para empilhamento. Ao chegar nestes espaços, o minério é classificado conforme sua granulometria, sem a utilização de água, sendo dividido entre mais grosso ou mais fino. Assim, ocorre a separação entre o material, uma vez que cada um dos formatos é destinado de um modo específico para o mercado.

Fonte: Adaptado de Nascimento et. al., 2020

Para o beneficiamento a seco, dependendo do teor do minério a ser beneficiado,

apenas o beneficiamento até a etapa de peneiramento não basta. Dessa forma, é necessário combinar outros tipos de tecnologias para melhorar a qualidade do produto. Além da etapa de peneiramento, pode ser combinada com a separação magnética para realizar a classificação dos minérios. O equipamento mais utilizado para esse fim são os ímãs permanentes de correias cruzadas, onde o produto magnético e não magnético é separado, concentrando o minério com um teor de ferro mais elevado.

Figura 4 - Comparação do beneficiamento a úmido com o beneficiamento a seco utilizado pelo complexo S11D da Vale S.A.



Fonte: Adaptado de Nascimento et. al., 2020

Na Figura 4, tem-se listadas as vantagens do beneficiamento a seco do complexo S11D da Vale S.A. do Canaã dos Carajás. No processo de beneficiamento a seco utilizado por esse complexo termina na etapa de peneiramento, não utilizando água e quantidades significativas de energia elétrica para a concentração do minério de ferro. Dessa forma, os valores reduções nesse beneficiamento refletem a melhoria de um processo de beneficiamento a seco na questão ambiental em comparação ao a úmido para minérios de alta qualidade.

3.2. Processo de pelotização e sinterização do minério de ferro

O processo de beneficiamento do minério de ferro é essencial para que o material atinja as especificações químicas, físicas e metalúrgicas para o processo de fabricação do ferro. A depender no tamanho da partícula do minério, as partículas mais finas não podem ser adicionadas diretamente no reator de redução para a redução e derretimento do ferro, produzindo ferro líquido. Dessa forma, essas partículas, chamadas de *sinter feed* ou *pellet feed* devem passar por diferentes processos de aglomeração: a sinterização e a pelotização, respectivamente. Na Tabela 3, tem-se classificado os diferentes tipos de produto que podem ser obtidos do minério de ferro.

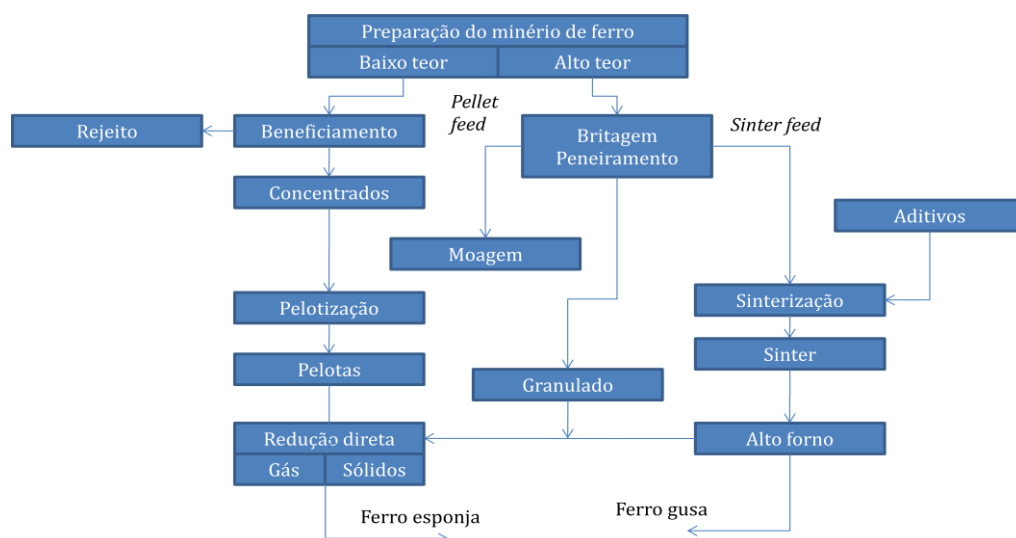
Tabela 3 - Diferenças de classificação do minério de ferro de acordo com o tamanho da partícula do produto.

Produto	Faixa de tamanho (mm)	Aplicação Básica
Concentrado	6,3 – 31,7	Alimentado em alto-forno e redução direta
<i>Sinter feed</i>	0,15 – 6,3	Aglomeração por sinterização para alimentação em altos-fornos
<i>Pellet feed</i>	<0,15	Aglomeração por peletização para alimentação em altos-fornos e redução direta

Fonte: Adaptado de Moraes et. al., 2025.

Na Figura 5 é apresentado o processo completo de preparação do minério de ferro, desde a etapa de beneficiamento do minério até a sua redução. A classificação do minério de ferro pode ser separada em dois tipos: baixo teor e alto teor. O minério classificado como “baixo teor” possui um baixo teor de concentração de ferro, precisando passar pela etapa de beneficiamento e concentração do minério. Enquanto isso, o minério classificado com alto teor de ferro não necessita passar pela etapa de concentração por já possuir a classificação requerida para o processo de fabricação do ferro.

Figura 5 - Processo de preparação do minério de ferro



Fonte: Adaptado de Souza, 2023.

No processo de sinterização, o minério de ferro é preparado para ser utilizado em um alto-

forno. Durante essa etapa, o minério é misturado com coque, que é um carvão carbonizado, e um fundente. Essa mistura é então carregada na câmara do alto-forno. A queima do coque gera calor intenso e gases que promovem a redução do minério de ferro, transformando-o em ferro metálico.

Por outro lado, na pelletização, o pellet feed e o minério concentrado são processados por meio de uma moagem inicial. Após essa etapa, o material é levado para um tambor ou disco de aglomeração, onde é alimentado em uma extremidade do equipamento cilíndrico. Este equipamento possui pulverizadores de água que, combinados com a rotação do tambor, formam pellets de diferentes tamanhos. Para garantir a uniformidade dos pellets, o produto final é submetido a um processo de peneiração.

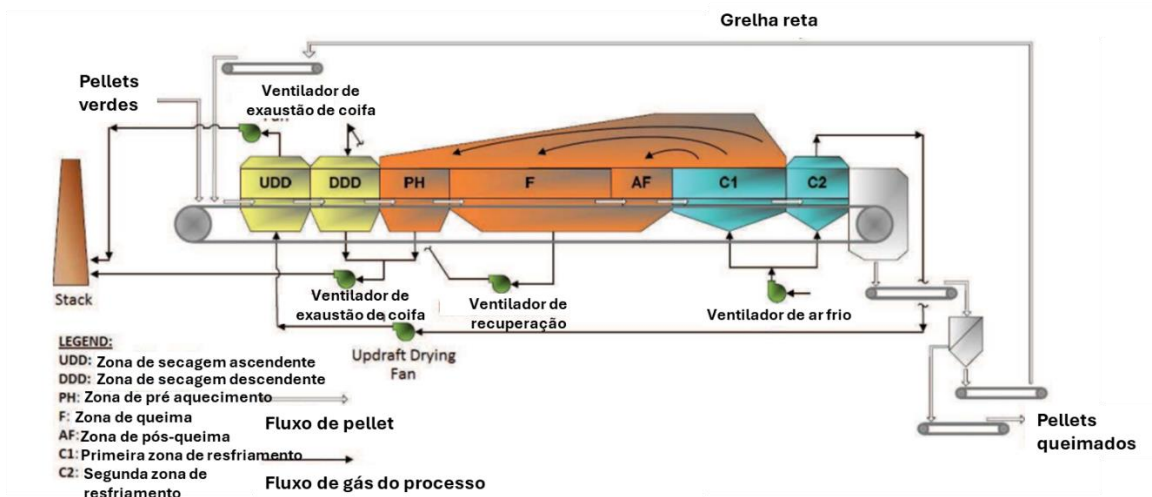
Após a pelletização, a redução direta do minério de ferro é realizada. Os equipamentos mais comuns utilizados nessa etapa são a grelha reta, ilustrada na Figura 6 e o forno rotativo, ilustrado pela Figura 6.

O processo de grelha reta utiliza um forno único, dividido em quatro zonas: a primeira para secagem, a segunda para o pré-aquecimento do minério, a terceira endurecimento dos *green pellets* e a última de resfriamento. Os *green pellets* são grânulos de minério de ferro que foram formados durante o processo de pelletização, mas que ainda não passaram por um tratamento térmico ou processo de sinterização.

O sistema é projetado para otimizar a recuperação de calor, utilizando dois fluxos de ar ambiente que são aquecidos enquanto resfriam os pellets endurecidos quentes. Esses fluxos de ar aquecido são redirecionados para outras zonas do forno, permitindo a recuperação do calor latente.

A secagem dos *green pellets* no processo de grelha reta ocorre em duas fases. Na primeira fase, ar quente proveniente da zona de resfriamento é soprado pela parte inferior do leito de pellets. Na segunda fase, ar aquecido da zona de combustão é soprado pela parte superior do carro. Essa abordagem de secagem ascendente e descendente assegura um tratamento uniforme ao longo da altura do leito de *pellets*. O processo de redução do minério por grelha reta está ilustrado na Figura 6.

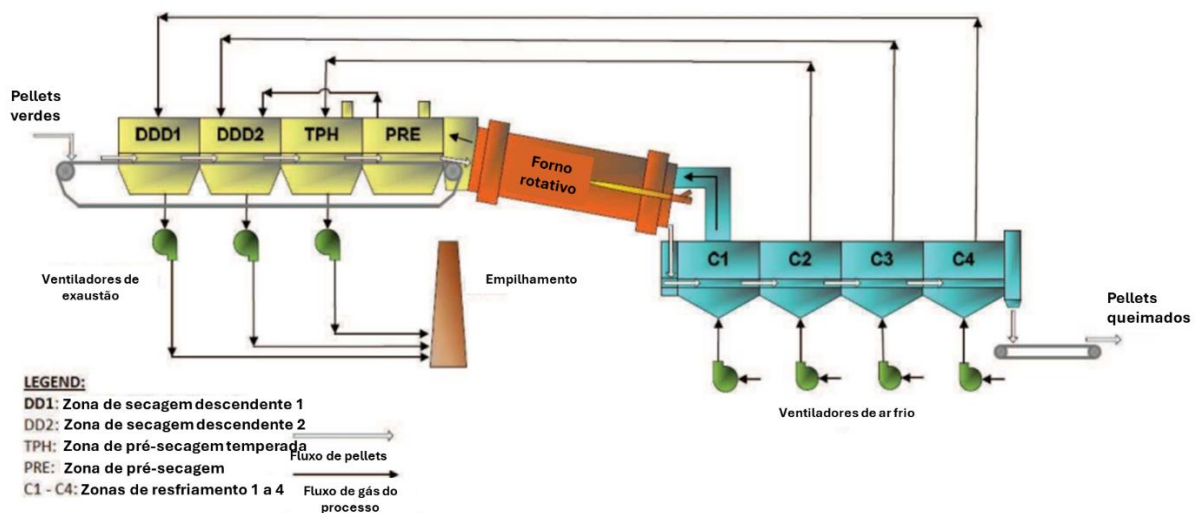
Figura 6 - Processo de redução do minério por grelha reta.



Fonte: Adaptado de Zhu, 2022.

No processo de grelha-forno, tem-se três unidades separadas. A primeira de secagem, dividida em duas zonas de secagem e de pré aquecimento dos *green pellets*. A segunda, no forno rotativo, o minério é reduzido e endurecido. No final, o minério passa por quatro zonas de resfriamento. Na Figura 7 está representado o processo de grelha-forno.

Figura 7 - Processo de redução do minério por forno rotativo.



Fonte: Adaptado de ZHU, 2022.

Em relação às vantagens e desvantagens de cada tipo de equipamento, o forno rotativo possui menor consumo de energia elétrica devido a utilização de menores ventiladores de

processo, melhor qualidade do produto final, devido a melhores condições de queima de pellets, menor custo de processo. Porém, a o forno de grelha reta possui menor geração de finos devido a menos pontos de transferência durante do processo (Moura, 2012).

4. Processamento mineral no mundo e suas características principais

4.1. Minério de alta qualidade

4.1.1. Beneficiamento a úmido

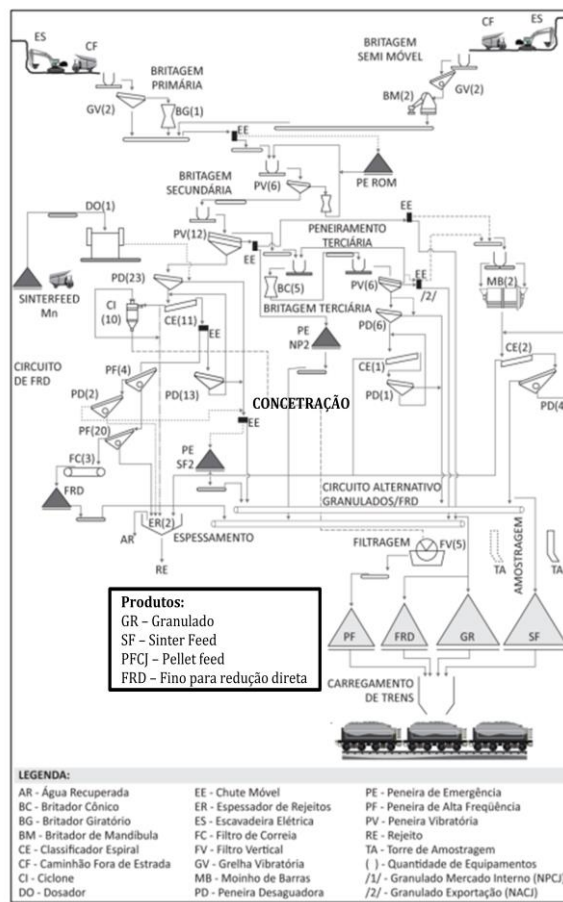
4.1.1.1. Complexo industrial de Carajás: Extraído do estudo de Herbert Ricardo Garcia Viana, 2017.

No complexo industrial de carajás são obtidos três produtos principais a partir do beneficiamento do minério: o *pellet feed*, o *sínter feed* e o material granulado. O processo de beneficiamento começa a partir da etapa de britagem primária. No processo há três equipamentos de britagem primária de modo a diminuir o tempo e custo do transporte, aumentando a capacidade de alimentação da usina.

Toda essa alimentação é levada para a britagem secundária, onde a granulometria do minério é reduzida ainda mais para facilitar na etapa de classificação do minério. Caso o material não tenha atingido a granulometria desejada, ele retorna ao equipamento de britagem secundária. Em seguida, após o minério já ter passado pela britagem, ele é direcionado ao sistema de peneiramento, onde é iniciado o deságue mecânico. Na peneiração secundária é que o minério começa a ser separado por granulometria, de acordo com os produtos *sínter feed*, *pellet feed* e material granulado.

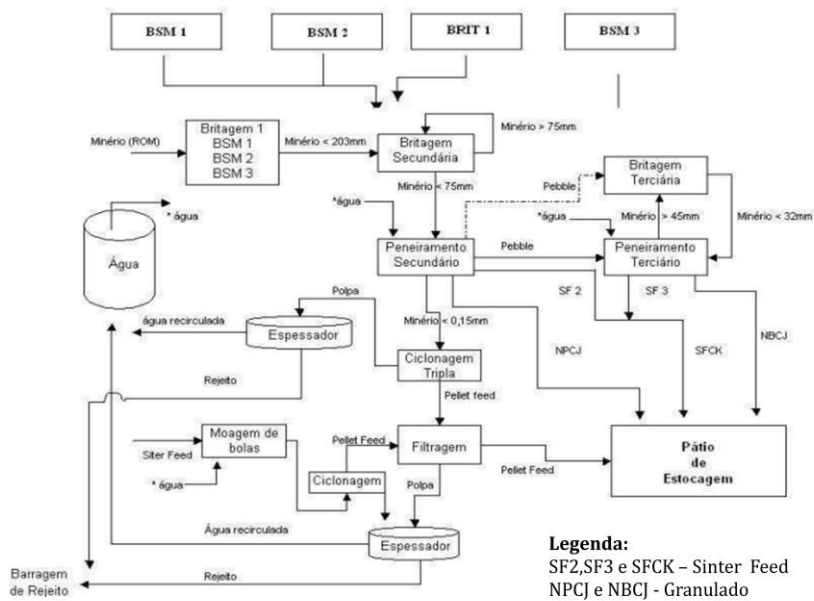
De acordo com a classificação do minério, o material é encaminhado para etapas diferentes de beneficiamento. Nas Figuras 8 e 9, os fluxogramas esquemáticos detalhado desse processo ilustra bem como que cada classificação do minério é direcionada.

Figura 8 - Processo de beneficiamento do minério de ferro pela Vale dos Carajás.



Fonte: Adaptado de Luz et. al., 2018.

Figura 9 - Fluxograma detalhado do processo de beneficiamento do minério de ferro pelo Vale dos Carajás.



Fonte: Adaptado de Luz, et. al., 2010.

Como pode ser observado pelo fluxograma detalhado, todo minério com granulometria $< 0,15$ mm é encaminhado para a etapa de ciclonagem tripla, a polpa desse minério que não é classificada como pellet feed é encaminhada para um espessador e utilizado na água recirculada e uma parte classificada como rejeito e direcionado para uma barragem.

No processo, há quatro pontos de adição de água: no peneiramento secundário, no peneiramento terciário, na moagem de bolas e no reservatório de água onde a água recirculada do processo é armazenada. Mesmo com o processo recirculando água, de modo a diminuir a quantidade de efluentes produzidos, ainda há um grande consumo de água e deposição de rejeitos a partir desse tipo de beneficiamento.

4.1.1.2. Processo da planta úmida das minas de minério de ferro de Noamundi, Tata Steel Ltda

As minas de minério de ferro de Noamundi, pertencentes à Tata Steel Ltda, são uma das principais fontes de minério de ferro na Índia e desempenham um papel crucial na indústria siderúrgica do país. Localizadas no estado de Jharkhand, essas minas estão situadas em uma região rica em recursos minerais, com uma longa história de exploração e produção de minério de ferro.

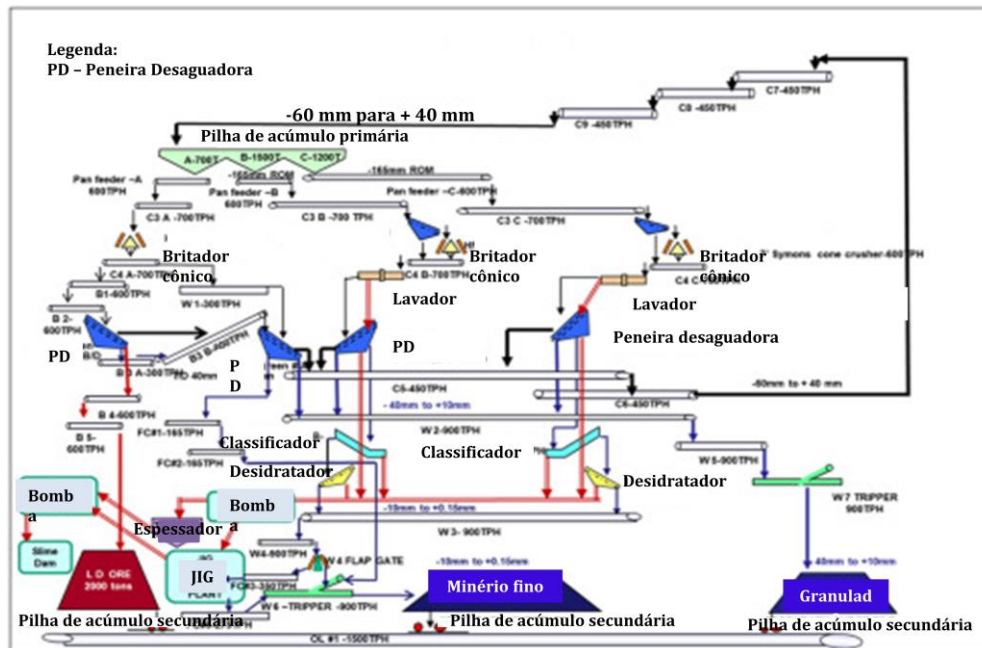
No processo ilustrado pela Figura 10, inicialmente, o minério é triturado em várias etapas, utilizando britadores giratórios para os circuitos primário e secundário, e um britador cônico de cabeça curta para a britagem terciária, que opera em circuito fechado.

Após a britagem, o minério é processado em um lavador de tambor úmido, onde uma fração classificada é recuperada como minério de qualidade. A fração menor resultante da britagem terciária é enviada para classificadores de parafuso, que separam o material em duas partes: uma fração mais grossa, que pode ser desaguada e enviada para a jigagem, e uma fração mais fina, que é direcionada para hidrociclones para uma classificação adicional (Rao, et. al. 2023).

A jigagem é um método de beneficiamento de minérios que utiliza um equipamento chamado "jig" para separar partículas minerais com base em suas densidades. É uma técnica amplamente utilizada na mineração, especialmente para a separação de minérios de ferro, carvão, ouro e outros minerais que apresentam diferenças significativas em densidade.

O subproduto dos hidrociclones é misturado ao concentrado de finos, enquanto o sobreproduto é enviado para espessadores, onde a polpa é espessada antes de ser bombeada para a barragem de rejeitos.

Figura 10 - Processo de beneficiamento úmido da planta de Noamundi, Tata Steel Ltda.



Fonte: Adaptado de Rao, et. al. 2023.

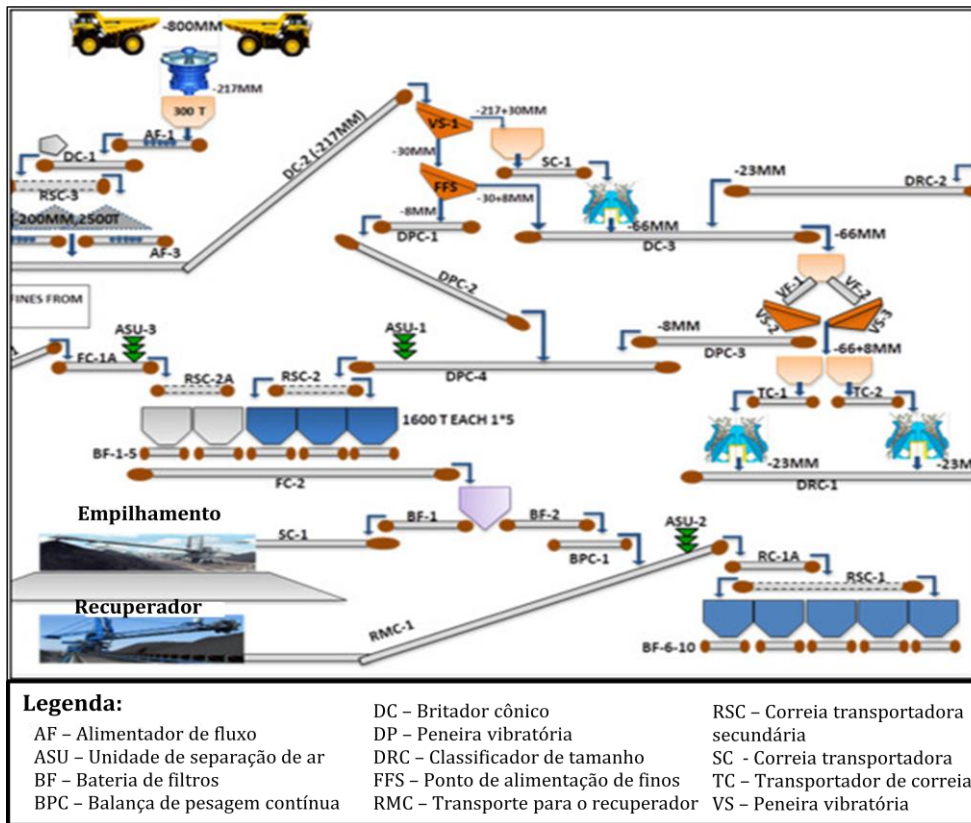
Nesse processo, há o espessamento da polpa, antes de ser levada para barragem de rejeitos, de modo a maximizar a recuperação do minério no processo e reduzir a quantidade de rejeitos, ainda assim a deposição de efluentes existe e é armazenada em uma barragem.

4.1.2. Beneficiamento a seco

4.1.2.1. Minas de minério de ferro Joda – Tata Steel Ltda.

No processamento a seco de minério de ferro, o minério ROM (minério em sua forma natural, sem passar pelo processo de beneficiamento) é geralmente triturado abaixo de 40 mm através de britagem em três estágios e, em seguida, segregado por peneiramento em frações de 10–40 mm e –10 mm. Para minérios mais macios, o índice de tumbler (medida utilizada para avaliar a resistência mecânica e a durabilidade de minérios) é geralmente baixo e, portanto, o minério em bloco é triturado abaixo de 10 mm para produzir um produto 100% fino. O rendimento das plantas tem sido geralmente de 100%, pois nenhum resíduo é descartado dessas plantas. Assim, a qualidade do produto é equivalente à qualidade da alimentação (RAO, et. al. 2023). O fluxograma de processamento a seco da planta seca das minas de minério de ferro de Joda, da Tata Steel Ltd, é representado na Figura 11.

Figura 11 - Processo de beneficiamento das minas de ferro Joda, Tata Steel Ltda.



Fonte: Adaptado de Rao, et. al. 2023.

Como pode ser avaliado pelo processo de beneficiamento a seco que temos atualmente, o processo é finalizado na etapa de peneiramento sem processos de beneficiamento mais complexos para a concentração do minério de ferro. Dessa forma, a qualidade do produto não é tão diferente da qualidade do minério alimentado, sendo possível realizar esse processo dessa forma apenas com minério de alto teor de ferro.

Um lado positivo dessa tecnologia é não ter a geração de rejeitos e 100% do produto ser aproveitado, realizando apenas uma classificação da matéria prima. Porém, há uma grande necessidade de evoluir esse processamento para a utilização em maior escala e para o beneficiamento de minérios com menor qualidade. (Rao, et. al., 2023).

4.2. Minério de baixa qualidade

Minérios de baixo teor, ou "low grade ore", referem-se a depósitos de minério que contêm uma concentração inferior de minério de ferro em comparação com minérios de alta qualidade. Esses minérios geralmente apresentam desafios adicionais no processo de beneficiamento devido à sua composição mineral menos favorável. No contexto do

processamento de minérios de ferro, as plantas de beneficiamento para minérios de baixo teor variam significativamente, mas os princípios operacionais subjacentes são bastante semelhantes.

O método de seleção do fluxograma de beneficiamento é crucial para maximizar a recuperação dos minérios de baixo teor. Para frações mais grossas (acima de 1 mm), a jigagem é amplamente utilizada como uma técnica de beneficiamento. Em alguns casos, separadores de mídia densa também são aplicados para melhorar a eficiência do processo. Para as frações menores que 1 mm, são empregadas combinações de espirais, hidrossizers e separadores magnéticos de alta intensidade (WHIMS) para otimizar a recuperação do ferro (Rao, et. al. 2023).

Além disso, os rejeitos gerados no circuito de +1 mm geralmente são moídos para melhorar a liberação dos minerais e, em seguida, beneficiados no circuito de -1 mm, a fim de maximizar a recuperação total. Esse enfoque na recuperação e beneficiamento de minérios de baixo teor é fundamental para aumentar a eficiência e a viabilidade econômica das operações de mineração, especialmente em um cenário de crescente demanda por ferro (Rao, et. al. 2023).

Na planta de beneficiamento da TSMC, o minério é britado em tamanhos menores usando britadores. O minério purificado é então alimentado no circuito de beneficiamento. As frações mais grossas são tratadas em gabaritos, que operam em paralelo. Esses gabaritos utilizam pressão de ar e água para o processo. O concentrado obtido é desidratado em uma centrífuga e considerado como finos de sinterização. Os rejeitos do jigging, que saem do equipamento “jig”, são triturados em moinhos até ficarem bem finos (Rao et. al., 2023).

As frações menores são beneficiadas em um circuito composto por espirais e hidroclassificadores. A fração fina é alimentada nas espirais, cujo concentrado é encaminhado para um hidroclassificador. O concentrado desse circuito é desidratado e misturado com os finos de sinterização. Os rejeitos do hidroclassificador são moídos em moinho de bolas e depois tratados em um processo chamado WHIMS, onde o concentrado é desidratado e utilizado como pellets finos. Os rejeitos do WHIMS são enviados para um espessador, e a lama resultante é descartada como rejeitos (Rao et. al., 2023). Na Figura 12 está detalhado o processo de minério de ferro de baixa qualidade.

separação magnética (Rao, et. al., 2023). O método de separação magnética permite a concentração do minério de ferro, resultando em um método de classificação que aumenta o teor de ferro do produto.

Ainda assim, diante do panorama apresentado na Tabela 4, é possível notar a necessidade de buscar novas tecnologias para serem implementadas no processo de beneficiamento do minério, de modo a reduzir o impacto ambiental causado por essa indústria.

Tabela 4 - Panorama das tecnologias de beneficiamento de minério de ferro utilizada por diferentes indústrias.

S. no.	Mina	Tipo de minério	Processo utilizado
1.	Meghataburu, Boiani (Jharkhand)	Hematita	Trituração (quatro estágios), lavagem, enxágue (quatro estágios), classificação, desidratação, ciclonagem, espessamento e filtração.
2.	Kiriburu, Bolani (Jharkhand)	Hematita	Trituração (quatro estágios), lavagem, enxágue (quatro estágios), classificação, ciclonagem e espessamento.
3.	Barsua, Keonjhar (Orissa)	Hematita	Trituração (dois estágios), lavagem, enxágue (dois estágios), peneiramento e classificação, jigging, desidratação e espessamento.
4.	Donimalai (Karnataka)	Hematita	Trituração (três estágios), enxágue (dois estágios), classificação, desidratação, espessamento e filtração.
5.	Essar Dabuna, (Orissa)	Hematita	Britagem, moagem, separação magnética (HGMS) e allflux.
6.	Bailadala No.14. Bastar (Chhattisgarh)	Hematita	Trituração (dois estágios), enxágue (dois estágios), classificação, desidratação e espessamento.
7.	Dhaili, Durg (Chhattisgarh)	Hematita	Processo a seco, britagem e peneiramento (dois estágios) seguido de mistura.
8.	Rajhara, Durg (Chhattisgarh)	Hematita	Processo a seco, britagem e peneiramento (duas etapas).

9.	Kudremukh (Karnataka)	Magnetita	Britagem, moagem, separação magnética (LIMS), espirais, separação por densidade de flotex e flotação de coluna.
10.	Minas de Sarda, JSPL	Hematita	Britagem, jigging e separação magnética.
11.	Fomento, Goa	Hematita and magnetita	Britagem, lavadora de toras e separação magnética (LIMS, MIMS e HGMS).
12.	Sesa Goa	Hematita	Trituração, lavador de toras e separação magnética (WHIMS).
13.	Minas de Sishen and Minas de Kumba iron ore, África do Sul	Hematita	Britagem, jigging, separação de meios densos (ciclones e banhos) e allflux.
14.	Minas de LKAB iron ore, Sweden	Magnetita	Moagem, separação magnética e flotação para remoção de apatita.
15.	Mina de Mount Whaleback, Newman, Australia	Hematita	Britagem, separação de meios densos (ciclones e banhos) e espirais.
16.	Mina Tilden (Cleveland), Michigan, United States	Silícioe hematita	Moagem, floculação seletiva e flotação.

Fonte: Adaptado de Rao, et. al., 2023.

Dessa forma, deve-se avaliar dentre as tecnologias que são utilizadas no mundo, o que é relevante para ser aplicado no contexto no brasileiro em questão da qualidade do minério após o beneficiamento, impacto ambiental da tecnologia utilizada, no sentido de geração de resíduos, e a possibilidade de reaplicação no cenário nacional.

A mineração é uma atividade essencial para a economia global, fornecendo matérias-primas fundamentais para diversos setores, incluindo construção, energia e tecnologia. Entretanto, essa atividade também é frequentemente associada a impactos ambientais significativos, como degradação do solo, poluição da água e emissão de gases de efeito estufa. Neste contexto, o conceito de desenvolvimento sustentável emerge como uma abordagem necessária para equilibrar a exploração dos recursos naturais com a preservação ambiental e o bem-estar das comunidades locais.

O desenvolvimento sustentável, conforme definido por Sachs (2004), deve ser comprometido com cinco pilares: econômico, ambiental, social, territorial e cultural. Na

indústria de mineração, isso significa que as empresas devem não apenas buscar lucros, mas também considerar os impactos ambientais de suas operações e a responsabilidade social em relação às comunidades afetadas.

Historicamente, a atividade mineradora enfrentou crescentes exigências regulatórias, especialmente a partir da década de 1970, quando movimentos ambientalistas começaram a pressionar por práticas mais rigorosas. A introdução de Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA) se tornou uma exigência para a abertura de novas minas. Além disso, o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), implementado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral, no Brasil, em 2002, destacou a importância do fechamento responsável de minas, assegurando que o impacto ambiental negativo fosse mitigado (Luz et. al., 2018).

De acordo com Luz e Lins (2018), os rejeitos do minério já foram submetidos a uma etapa de cominuição e encontra-se em frações finas, com alta área superficial e consequente aumento de reatividade química. Dessa forma, é notória a necessidade de encontrar alternativas para o reaproveitamento desses rejeitos como para a fabricação de areia artificial, fertilizantes, sub-base de estradas em substituição à brita, entre outros.

Além disso, é necessário repensar a forma como é realizado o beneficiamento do minério de ferro de modo a diminuir a quantidade de rejeito produzido. Nesse contexto, deve-se avaliar a utilização de novas tecnologias para esse fim, analisar os trabalhos que já estão sendo feitos por algumas indústrias mineradoras e aplicar em grande escala nesse segmento.

5. BENEFICIAMENTO TÉRMICO E SECAGEM DO MINÉRIO DE FERRO

Cada vez mais é necessário utilizar frações de menor qualidade de minério de ferro extraído das minas, devido ao esgotamento dos recursos com alta qualidade que não precisam de etapas de beneficiamento tão complexas. Dessa forma, o desenvolvimento de tecnologias que aumentem a qualidade e teor desses minérios de menor qualidade é essencial para a indústria de ferro no futuro (Luz et. al., 2010).

Atualmente, o beneficiamento predominante utilizado para o minério de ferro é o beneficiamento úmido, onde a concentração do minério é feita pelo desaguamento mecânico, retirando os finos a partir de um ciclo de peneiras desaguadoras. Do outro lado, devido a grande quantidade de água de rejeito produzida nesse processo, o beneficiamento a seco é uma opção bem tentadora e que está ganhando o mercado, como utilizado no Complexo S11D, na cidade Canaã dos Carajás pela Vale S.A. e nas minas de minério de ferro Joda pela

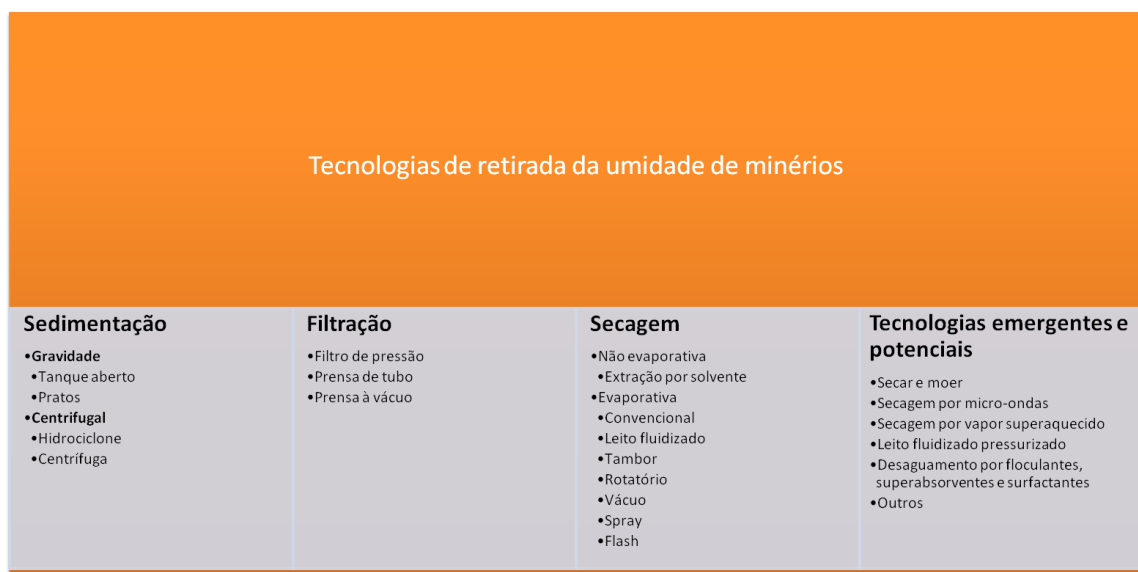
Tata Steel Ltda.

Embora várias tecnologias de beneficiamento tenham sido discutidas, a crescente complexidade dos depósitos dificulta a obtenção do teor de ferro desejado com alta recuperação e baixo custo usando métodos convencionais. A separação magnética é eficaz para a recuperação de magnetita, mas a maioria dos minérios atualmente minerados é dominada por hematita, goethita e siderita, que são fracamente magnéticos. Para tirar proveito das técnicas de separação magnética, é necessário modificar as propriedades magnéticas desses minérios (Luz et. al., 2010).

Entre os processos de secagem mais utilizados na indústria mineral, destacam-se os métodos de secagem evaporativa e não evaporativa. Para o minério de ferro, o tipo de secagem mais utilizado para pellet feed é a secagem convectiva, geralmente utilizando secador de grelha ou secador rotativo.

Na indústria mineral como um todo, além dessas tecnologias já estabelecidas, há também tecnologias emergentes e potenciais que estão começando a ser estudadas para aplicação na indústria mineral. Entre essas tecnologias estão a secagem por micro-ondas, secagem a vapor superaquecido, secagem em leito fluidizado pressurizado, e técnicas aprimoradas com o uso de floculantes, surfactantes e superabsorventes, entre outros métodos. Na Figura 13 tem-se um fluxograma ilustrativo com as principais tecnologias utilizadas para desaguamento mineral.

Figura 13 - Tecnologias de desaguamento mineral



Fonte: Adaptado de Bennita et. al., 2021.

Neste trabalho, o objetivo é explorar novas tecnologias para o beneficiamento e secagem do minério de ferro, com foco em soluções térmicas que possam substituir as atuais tecnologias de beneficiamento úmido, as quais geram uma quantidade significativa de rejeitos. Serão analisadas diversas tecnologias de secagem que podem ser aplicadas para aprimorar a qualidade do produto final, especialmente no caso de minérios de qualidade inferior e com baixo teor de ferro, que demandam processos de beneficiamento mais eficientes.

5.1. Novas tecnologias para beneficiamento térmico do minério de ferro.

O beneficiamento a seco já é adotado por algumas indústrias como forma de diminuir a quantidade de rejeitos gerados no processo de beneficiamento do minério. Em comparação com o beneficiamento a úmido, como apresentado na Figura 3, o beneficiamento a seco reduz 93% o consumo de água, em 50% as emissões GEE e em 70% o consumo de combustíveis. Porém, como analisado anteriormente, a forma como é realizado nas indústrias não proporciona uma melhora significativa na qualidade do minério, sendo apenas possível realizar em minérios que já possui um grau alto de qualidade e teor de ferro. Apenas na Rússia no depósito de Bakchar, na região de Tomsk que se é utilizada a tecnologia de separação magnética por via seca para beneficiamento do minério de ferro devido à falta de recursos hídricos.

Dessa forma, a busca por tecnologias que permitam essa melhora na qualidade do minério se torna necessária. Primeiramente, no quesito de novas tecnologias para beneficiamento térmico do minério de ferro vem sendo muito estudada a separação magnética do minério em meio ao beneficiamento a seco. Na Tabela 5, estão descritos os trabalhos que serão apresentados e discutidos nesse capítulo.

Tabela 5 - Trabalhos desenvolvidos sobre o beneficiamento térmico do minério de ferro.

Título	Autor (ano)	Origem	Escala
Processamento Mineral a Seco: Testes em Laboratório com Minério de Ferro de Depósito no Sudoeste do Quadrilátero Ferrífero	AMORIM (2022)	Brasil	Teste em escala de bancada e piloto
Beneficiamento de minério de ferro particulado grosso usando um separador de leito fluidizado baseado em	JINGFENG, et. al. (2017)	China	Escala piloto

densidade seca

Beneficiamento solar do minério de ferro

RAHBARI, et. al. (2018)

Austrália

Simulação

Fonte: Autoria própria, 2025.

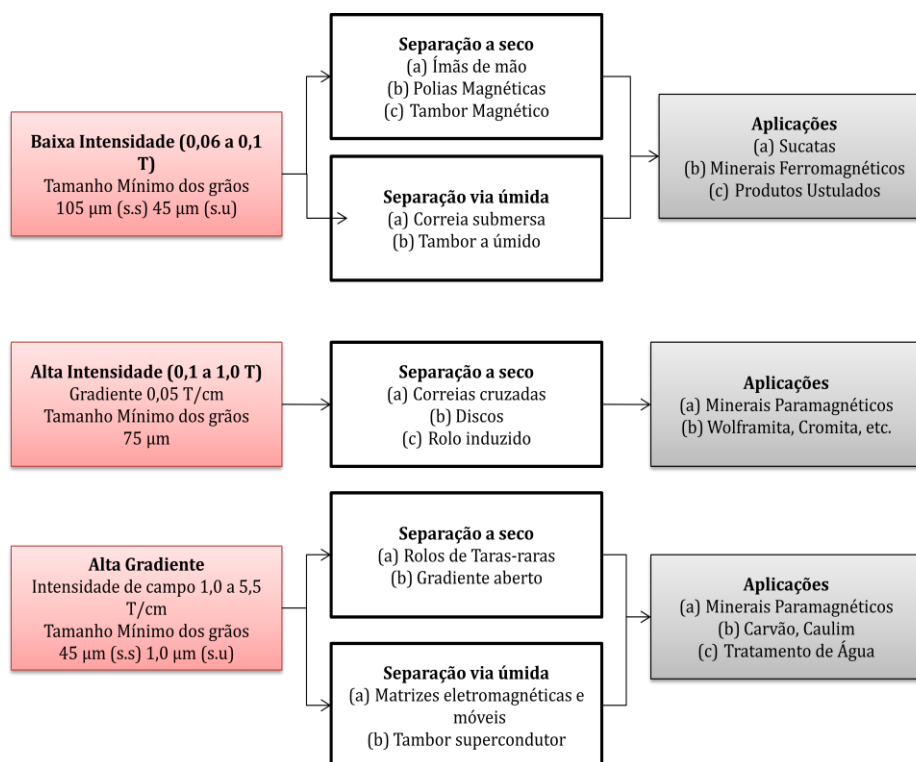
Nas subseções seguintes serão discutidos os trabalhos apresentados na tabela individualmente. Foram escolhidos os seguintes trabalhos por serem estudos com origem em países grandes produtores de minério de ferro. Os três estudos exploram diferentes tecnologias para o beneficiamento a seco. Como tratado anteriormente, o beneficiamento a seco usualmente termina na fase de peneiramento, não havendo muita aplicabilidade de métodos que realizem a concentração do minério de forma a aumentar a sua qualidade.

5.1.1. Processamento Mineral a Seco: Testes em Laboratório com Minério de Ferro de Depósito no Sudoeste do Quadrilátero Ferrífero

No trabalho de Amorim (2022), foi realizado um teste em bancada em escala piloto de processamento mineral a seco com minério de ferro da mina Serra dos Alemães. O minério de ferro dessa mina é formado principalmente por magnetita e proporções de itabiritos silicosos. O principal produto formado dessa mina é do tipo *sinter feed*.

De acordo com Luz et. al. (2018) a técnica da separação magnética não utiliza produtos químicos podendo ser aplicada tanto em processos de beneficiamento por via úmida como processos a seco. Nos processos a seco, essa tecnologia é aplicada em materiais com granulometria mais grossas e no processo a úmido em granulometrias mais finas (Amorim, 2022). Na Figura abaixo tem-se a classificação dos equipamentos de acordo com a intensidade do campo magnético e a granulometria do minério para via seca e úmida.

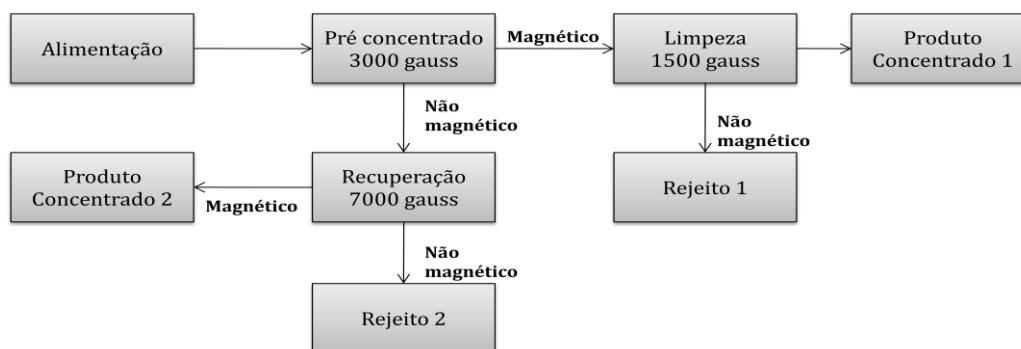
Figura 14 - Classificação de equipamentos pela intensidade do campo magnético.



Fonte: Adaptado de Sampaio, et. al., 2004.

No estudo, foi utilizado um imã de mão para a realização do experimento em escala de bancada, seguindo o fluxograma representado na Figura 15, que representou o melhor resultado do teste. Primeiramente, foi realizada a alimentação com o imã de mão com intensidade de 3000 gauss, gerando um composto magnético submetido a limpeza com uma intensidade menor de 1500 gauss, resultando no primeiro produto concentrado. O restante não magnético da primeira alimentação foi submetido a uma etapa de recuperação, submetido em uma intensidade magnética de 7000 gauss, gerando o segundo produto concentrado e seu rejeito.

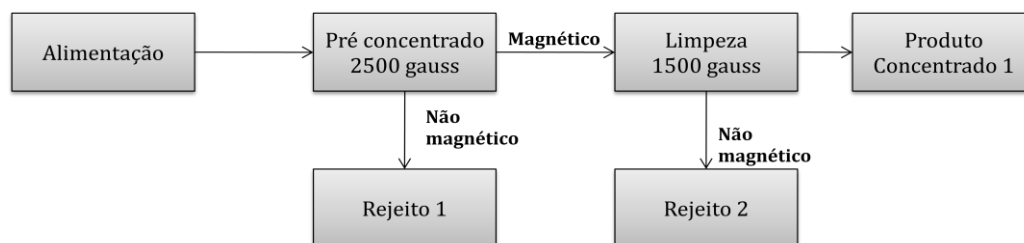
Figura 15 - Fluxograma do processo de beneficiamento por separação magnética.



Fonte: Adaptado de Amorim, 2022.

No teste piloto, foi utilizado um tambor magnético de 1500 e 2500 gauss para a concentração do minério de ferro, gerando uma pilha magnética de concentrado final, conforme demonstrado na Figura 16.

Figura 16 - Teste piloto do processo de beneficiamento por separação magnética.



Fonte: Adaptado de AMORIM, 2022.

Os resultados obtidos no estudo, após a etapa de limpeza, foram possíveis obter uma concentração de Fe entre 64,87% e 54,57% e uma recuperação de massa entre 46,23% e 12,26%. Isso se deve a diferença de concentração de FeO nas amostras.

Como conclusões do estudo, foi analisado que uma separação magnética de concentração do minério via seca pode ser aplicável e obtém resultados bem promissores. Talvez, para aumentar a concentração de ferro nas amostras, em um processo industrial é interessante a utilização de mais etapas de limpeza com outros graus de intensidade magnética, a depender do produto de interesse e qualidade final do minério.

5.1.2. Beneficiamento de minério de ferro particulado grosso usando um separador de leito fluidizado baseado em densidade seca

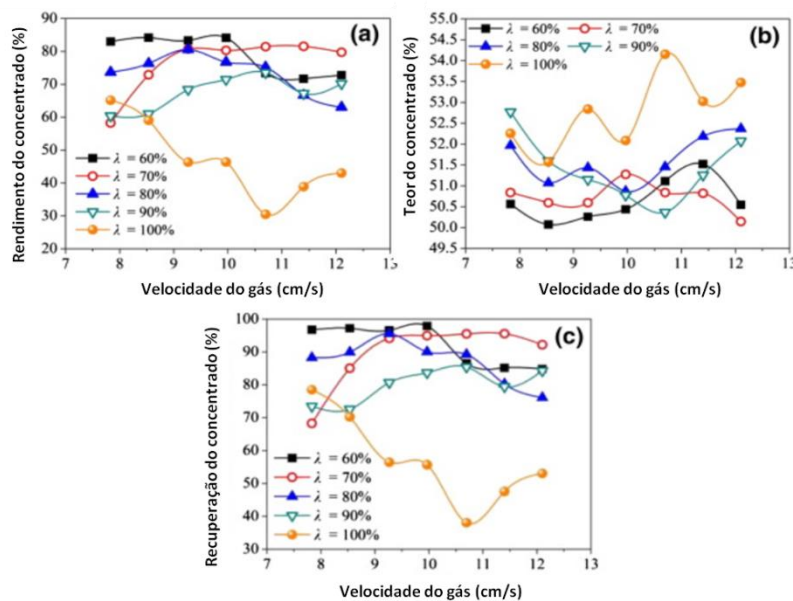
O estudo de Jingfeng (2017) investigou a separação de partículas de minério de ferro grosso utilizando um separador de leito fluidizado baseado em densidade a seco. Com a diminuição das reservas de minérios de ferro de alto grau e a crescente utilização de minérios paramagnéticos na indústria do aço, a eficiência na separação e purificação de minérios se tornou crucial.

Os pesquisadores utilizaram 500 partículas de minério de ferro, classificadas em cinco frações de tamanho, variando de $-31,5 + 25$ mm a $-10 + 6$ mm. O foco foi analisar as relações entre o tamanho das partículas, a distribuição de densidade e o teor total de ferro (Fe) para determinar a densidade de separação teórica.

A metodologia incluiu a investigação experimental dos efeitos da altura do leito estático, da velocidade do gás e da composição da mídia densa na estabilidade da densidade

do leito. O desempenho da separação foi avaliado com base em vários fatores operacionais, comparando o grau e o rendimento do concentrado, bem como a taxa de recuperação. O sistema consistia principalmente de um sistema de suprimento de ar, um sistema de controle de ar, o sistema de separação por leito fluidizado, um distribuidor de ar, um sistema de medição e coleta de parâmetros, um dispositivo de transmissão e controle de dados e um sistema de remoção de poeira.

Figura 17 - Resultados de (a) rendimento do concentrado (b) grau do concentrado (c) recuperação do concentrado.



Fonte: Adaptado de Jingfeng, 2017.

Analisando os resultados obtidos pela Figura 17, pode-se concluir que a separação a seco de minério de ferro utilizando um separador de leito fluidizado gás-sólido demonstrou resultados promissores, especialmente quando a proporção do pó de ferro atomizado (λ) foi ajustada adequadamente. Com a recuperação do concentrado em 80% e 90%, os teores ótimos de ferro total nas amostras foram de 52,4% e 52,8%, respectivamente, com recuperações satisfatórias de 80,7% e 79,0% em uma altura de leito estático adequada. Esses dados revelam a importância do controle preciso das condições operacionais para maximizar a eficiência da separação.

Além disso, quando a proporção de recuperação de concentrado foi reduzida para 70% e 80%, os teores de ferro total obtidos foram de 51,3% e 51,4%, com recuperações ainda mais altas, de 95,0% e 95,6%. Isso sugere que, ao ajustar a velocidade do gás, é possível otimizar ainda mais os resultados, destacando a flexibilidade do sistema em responder a diferentes configurações operacionais.

Entretanto, a eficiência de separação apresentou uma tendência de declínio conforme a fração de tamanho do minério de ferro diminuiu, indicando que o método de separação a seco tem um limite inferior em relação ao tamanho das partículas que podem ser processadas de maneira eficaz. Essa limitação é crucial para o desenvolvimento de estratégias de beneficiamento, pois sugere que minérios com tamanhos de partículas menores podem não ser tão eficientes para separação utilizando essa técnica.

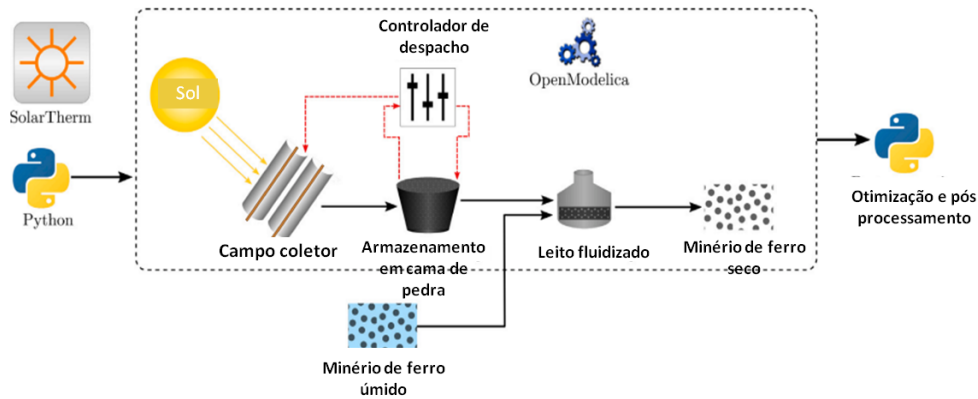
Portanto, a pesquisa enfatiza a necessidade de um entendimento mais profundo das variáveis envolvidas na separação a seco, especialmente em relação ao tamanho das partículas e à composição das mídias densas. A aplicação de separadores de leito fluidizado a gás-sólido apresenta uma alternativa viável e sustentável para o beneficiamento de minérios de ferro, mas é essencial que as condições operacionais sejam otimizadas para garantir a eficácia do processo em diferentes contextos de mineração.

5.1.3. Beneficiamento solar do minério de ferro

No artigo "Solar-thermal beneficiation of iron ore: System-level dynamic simulation and techno-economic optimisation", de Rahbari (2018), foi realizada uma simulação de beneficiamento do minério de ferro utilizando energia solar.

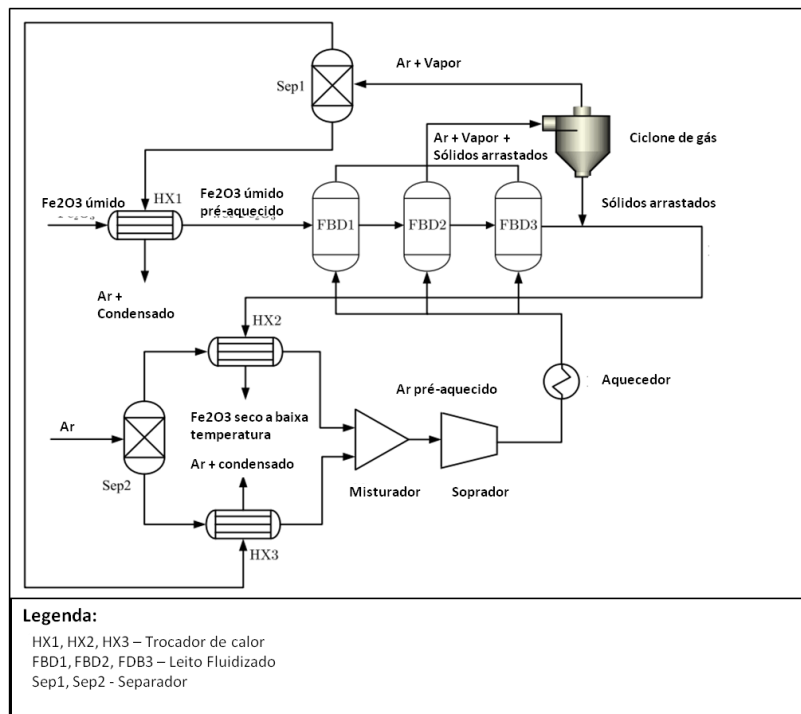
O processo de secagem solar-térmica do minério de ferro envolve a utilização de um sistema composto por um soprador, um secador de leito fluidizado e uma rede de trocadores de calor, conforme apresentado na Figura 18. A energia térmica necessária é fornecida por coletores solares parabólicos e um sistema de armazenamento em leito de rochas. O modelo físico do processo foi desenvolvido no software Aspen Plus, enquanto as simulações dinâmicas foram realizadas no OpenModelica. Na Figura 19, é apresentado o modelo do processo simulado pelo software Aspen Plus.

Figura 18 - Diagrama esquemático do modelo dinâmico para a planta de beneficiamento solar-térmico proposta pelo estudo.



Fonte: Adaptado de Rahbari et. al., 2023

Figura 19 - Modelo do processo simulado no Aspen Plus.



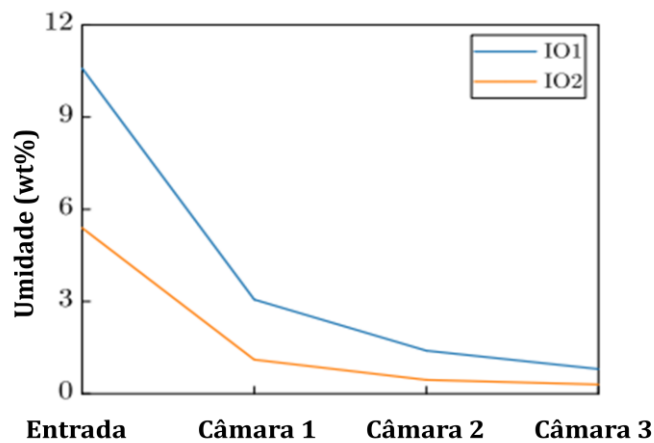
Fonte: Adaptado de Rahbari et. al., 2023.

O minério de ferro é adicionado úmido ao sistema de secagem, passando primeiramente por um trocador de calor e em seguida, o minério é aquecido e passado por uma sequência de três leitos fluidizados em série. O ferro seco então é levado novamente para um trocador de calor e um separador resultando em um ferro seco com baixa temperatura. O sistema possui armazenamento térmico em leito rochoso para recircular energia, no período da noite, do ar quente utilizado no processo.

Os pesquisadores desenvolveram um modelo em estado estacionário do processo

principal e realizaram simulações para extrair curvas de desempenho tanto em condições de projeto quanto fora delas. Essas curvas foram então integradas em um modelo dinâmico baseado em energia. O ponto de projeto assumido para a entrada térmica do processo foi de 50 MWth a 400°C. A capacidade de armazenamento e o múltiplo solar foram otimizados para alcançar o menor custo nivelado de secagem (LCOD). Na Figura 20 é apresentado um gráfico que mede a umidade do minério de ferro desde sua alimentação no sistema até a saída no terceiro leito fluidizado.

Figura 20 - Umidade de duas amostras de minério em função da passagem por câmaras.



Fonte: Adaptado de Rahbari et. al., 2023.

Os resultados indicaram que o custo nivelado de secagem (LCOD) alcançou 14,3 USD/t para minérios com 9,53% de umidade e 12,6 USD/t para minérios com 5,07% de umidade. Em uma escala maior, de 500 MWth, o custo pode cair para aproximadamente 10 USD/t. As economias estimadas em custos de transporte e carga de combustível nos processos subsequentes são de cerca de 2,2 USD/t.

Apesar de a análise econômica indicar que o processo é viável, para esse processo ser possível necessitaria de muito investimento nesse quesito para a indústria de mineração. O estudo também não tem dados sobre a qualidade do minério beneficiado, como o teor de ferro presente na amostra seca.

Mujumdar (2006) afirma que este tipo de sistema é improvável de ser aplicado em um contexto real da indústria de mineração. Mesmo assim, o estudo deve ser considerado como uma possibilidade futura de implementação, principalmente por ser um sistema que utiliza estoque de energia e pode ser operado sem interrupção.

5.2. Novas tecnologias para secagem do minério de ferro

Além das tecnologias para beneficiamento térmico do minério de ferro, foi estudado na bibliografia as pesquisas que foram feitas para o desenvolvimento da secagem dos produtos finais do beneficiamento, como por exemplo o *pellet feed* e o minério concentrado.

De acordo com Souza (2023) a maior parte dos estudos realizados se concentram em estudar a secagem em pelotas do que para o minério concentrado. Atualmente, a secagem dos produtos pelotas e minério concentrado é realizada principalmente por meios convectivos de secagem como fornos rotativos e grelhas, como já tratado em capítulos anteriores.

No presente trabalho, foram avaliados os estudos representados na Tabela 6, feitos nos últimos anos. O trabalho de Pickles (2009), é o único que não está dentro da faixa dos últimos dez anos, mas os resultados desse trabalho foram incorporados com o de Athayde (2018) devido aos dois abordarem a secagem por micro-ondas.

Tabela 6 - Trabalhos avaliados para secagem em pelotas e minério concentrado.

Título	Autor (ano)	Produto de mineração	
		Pelota	Concentrado
Secagem por Micro-ondas	Athayde (2018)	X	
Secagem por Micro-ondas	Pickles (2009)	X	
Secador de tambor utilizando tecnologia multiagente	Lomonos et. al. (2024)		X
Secagem de Pelotas de Minério de Ferro por Aquecimento de Super Alta Frequência (SHF)	Biakova (2018)	X	
Secagem convectiva de concentrado de minério de ferro: Abordagem experimental e simulações por fluidodinâmica computacional	Souza (2023)		x

Fonte: Autoria própria, 2025.

Nas subseções seguintes serão apresentadas e discutidas individualmente as operações de secagem listados na tabela 2.

5.2.1. Secagem por Micro-ondas

A secagem de minério de ferro por micro-ondas é uma abordagem inovadora que vem ganhando destaque na indústria mineral devido ao seu potencial de aumentar a eficiência energética e reduzir o impacto ambiental dos processos de beneficiamento. Essa tecnologia utiliza radiação eletromagnética para gerar calor diretamente nas partículas do minério, promovendo a evaporação da umidade de maneira mais rápida e uniforme em comparação aos

métodos tradicionais. Além disso, o processo oferece vantagens como redução no tempo de processamento e possibilidade de integração com sistemas existentes.

O aquecimento por micro-ondas ocorre devido à interação das ondas eletromagnéticas com moléculas polares, como a água presente no minério. Esse mecanismo gera calor interno nas partículas, promovendo a evaporação da umidade de dentro para fora, o que melhora a eficiência do processo. Estudos indicam que essa abordagem também pode minimizar danos estruturais ao minério e reduzir a geração de finos, aspectos cruciais para a qualidade do produto final (Gonçalves et. al., 2019).

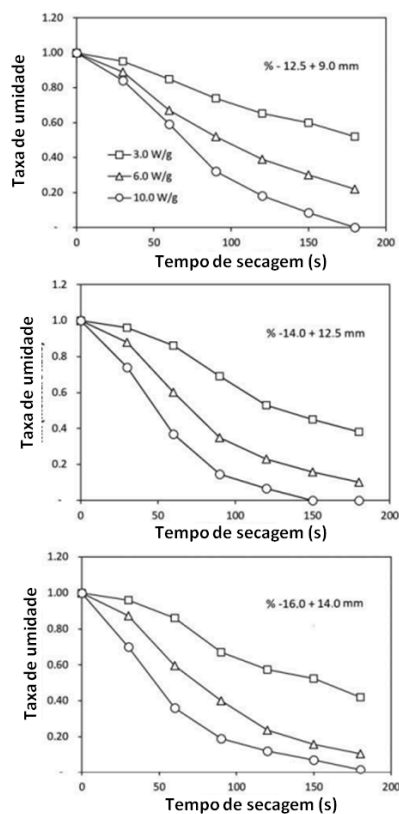
Na busca por soluções que atendam às exigências ambientais e econômicas, a secagem por micro-ondas desponta como uma alternativa promissora. Pesquisas recentes destacam o potencial dessa tecnologia para reduzir significativamente o consumo de combustíveis fósseis e as emissões de CO₂ associadas à secagem convencional (Silva et. al., 2020). Além disso, a possibilidade de integração com sistemas automatizados e o uso de fontes renováveis para geração de energia elétrica tornam essa abordagem ainda mais atrativa.

A secagem por Micro-ondas funciona a partir de irradiação intervalada em um forno micro-ondas e, juntamente ao sistema, é adicionado um sistema de exaustão para retirar o vapor de água retido no minério.

Athayde et. al. (2018) testou-se a secagem de pellets de minério de ferro em um sistema com forno micro-ondas e sistema de exaustão avaliando tempo de secagem, taxas de secagem e resistência mecânica. O experimento foi realizado utilizando pellets verdes e irradiados em intervalos de tempo em forno micro-ondas com prato giratório.

O experimento foi realizado com uma amostra de 100g, três ranges de tamanhos de pellets diferentes, +14.0–16.0 mm, +12.5–14.0mm, +9.0–12.5 mm e três densidade de energias diferentes aplicadas em cada amostra, 3, 6 e 10 W/g. O tempo de irradiação foi de 180s, com intervalos de 30s e, para determinação da umidade inicial a amostra foi seca em um forno com temperatura de 105°C por 8 horas. Na Figura 21 é apresentado o efeito da potência das micro-ondas em relação a umidade do minério de ferro em função do tempo.

Figura 21 - Efeito da potência das microondas em relação de umidade versus tempo, e diferentes condições de tamanho do pellet e densidade de potência.

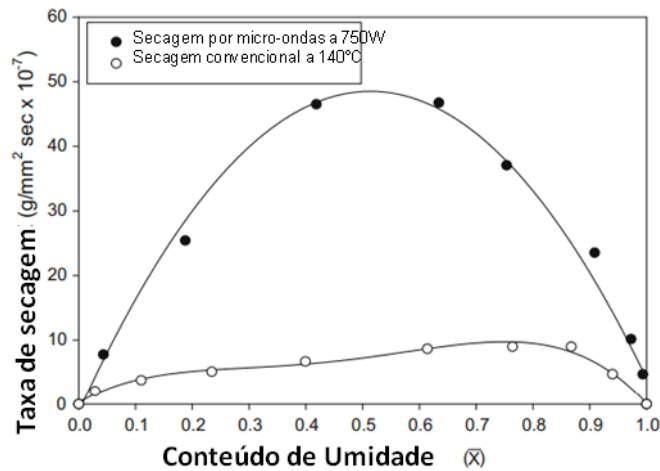


Fonte: Adaptado de Athayde et. al., 2018.

A partir desses resultados obtidos pelo artigo, pode-se concluir que os melhores resultados obtidos de tempo de secagem e diminuição de umidade foi com o pellet de tamanho entre 14,0 + 12,5 mm e densidade de energia aplicada de 10 W/g.

Em um estudo de Pickles (2009), foi realizado um teste de secagem com micro-ondas em minérios de níquel ferroso laterita limonita. Nesse estudo, foi avaliado a diferença entre a secagem por micro-ondas em 750 W e a secagem convencional em 140°C. Na Figura 22, é possível verificar que a taxa de secagem por micro-ondas se apresenta quase cinco vezes maior que a secagem pelo método convencional.

Figura 22 - Comparação entre taxa de secagem pela umidade da amostra de secagem convencional e secagem por micro-ondas.



Fonte: Adaptado de Pickles, 2009.

A secagem convencional é formada por três estágios: (i) set-up, onde o minério é aquecido até a temperatura determinada; (ii) taxa constante, onde a umidade é primeiramente removida da superfície do minério, e por meio da capilaridade, a água na região interna do grão é movida para superfície e então secada; (iii) taxa de decaimento: o estágio final se dá quando não é mais possível a ação da capilaridade e, então, a taxa de secagem decresce, sendo muito difícil retirar a umidade completa interna do grão. (Pickles, 2009).

Na secagem por micro-ondas, o calor fornecido é absorvido primeiramente pela água presente no minério, evaporando a água da superfície e as micro-ondas conseguem penetrar mais profundamente até o interior do minério, evaporando a água total do grão. Dessa forma, ao longo do tempo de exposição do grão as micro-ondas a temperatura interna do grão passa a ser maior que a da superfície. Assim, a secagem por micro-ondas possibilita uma maior transferência de massa e uma secagem mais rápida e uniforme do grão (Pickles, 2009).

O método apresenta uma grande inovação na forma de secagem, apresentando uma secagem muito mais uniforme e rápida em relação a secagem convencional. Porém, a necessidade de um investimento inicial alto e também o a utilização de energia elétrica para emitir o calor fornecido pelo sistema acaba tornando o processo muito mais caro. Além disso, para o minério de ferro, uma secagem uniforme não é essencial, por não ser um material sensível ao calor.

Dessa forma, para a aplicação desse tipo de tecnologia na indústria mineradora, é necessário mais estudo sobre o retorno de investimento da aplicação dessa tecnologia e comparação de custos e quantidade de energia utilizada entre essa tecnologia e a utilizada

atualmente.

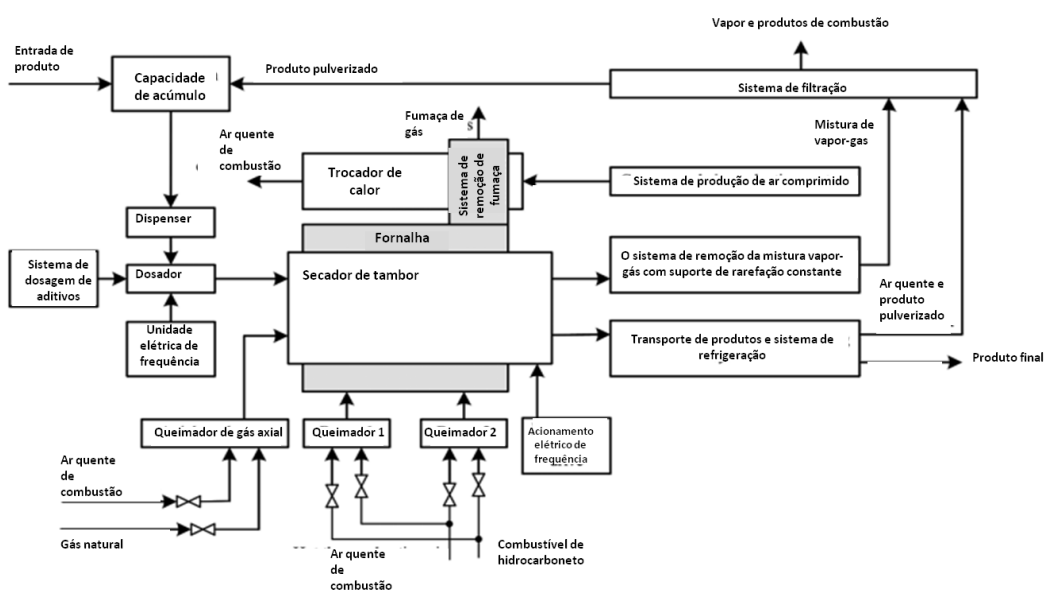
5.2.2. Secador de tambor utilizando tecnologia multiagente

O estudo presente no artigo "Designing the Predictive Control of a Drum Dryer Using Multi-Agent Technology" de Konokh, et. al. (2024) visa aumentar a eficiência das linhas de secagem de produtos a granel através da automação do controle utilizando tecnologia inteligente para determinar o estado do produto e prever seu teor inicial de umidade.

O estudo utilizou um modelo de secador de tambor com queimadores axiais e de forno para secar a carga utilizada na produção de concentrado de minério de ferro. Este modelo foi empregado para gerar exemplos de treinamento e controle. A tecnologia multiagente foi avaliada quanto à sua performance e precisão na previsão do teor inicial de umidade.

A tecnologia proposta envolve uma secadora de tambor rotativa dentro de um forno, onde o material e os gases de combustão são alimentados tanto em paralelo quanto em direções opostas ao movimento do produto. A secagem ocorre quando os gases do forno entram em contato com o material em três formas: quando o material cai das lâminas, da superfície do material acumulado no fundo do tambor e pelo contato com superfícies mais aquecidas. Na Figura 26 tem-se o esquema do equipamento e processo de secagem utilizando tecnologia multiagente.

Figura 23 - Esquema do equipamento e processo de secagem.



Fonte: Adaptado de Yur'eva et. al., 2018.

A tecnologia multiagente armazena e trabalha com vetores de sinais que consideram os atrasos temporais entre a mudança no sinal correspondente e a mudança na umidade do produto na saída da secadora. Cada agente contém uma descrição específica da situação dinâmica, ajustando-se automaticamente ao analisar *arrays* de sinais ao longo do tempo e gerando novos agentes quando situações não descritas pelos agentes existentes são detectadas.

Os resultados mostraram que a tecnologia multiagente é eficaz na previsão do teor de umidade do produto. A precisão da previsão foi comprovada através da implementação de um sistema multiagente que identificou corretamente o estado do produto e previu seu teor de umidade com base nos sinais de controle disponíveis. A tecnologia demonstrou ser capaz de estabilizar o parâmetro controlado, garantindo a qualidade do produto.

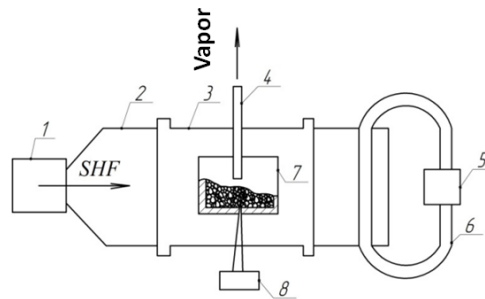
Entretanto, ainda faltam estudos sobre o retorno de investimento nesse tipo de tecnologia, bem como uma comparação de consumo de energia e gastos com a tecnologia atual utilizada.

5.2.3. Secagem de Pelotas de Minério de Ferro por Aquecimento de Super Alta Frequência (SHF)

A secagem com o uso de energia de super alta frequência (SHF) pode ser um método muito promissor por ser uma tecnologia mais limpa e eficiente. Esse capítulo tem como objetivo explorar a aplicação do aquecimento SHF na secagem de pelotas de minério de ferro, conforme estudado por Yur'ev, et. al. (2018).

O aquecimento por SHF utiliza ondas eletromagnéticas de alta frequência que possibilita o aquecimento mais uniforme do material, por possuir ondas direcionais e menos suscetíveis a difusão, promovendo a evaporação rápida da umidade. Esse método se baseia na interação do componente elétrico do campo SHF com o material, resultando em perdas dielétricas que geram calor. Este tipo de aquecimento é eficiente e não contamina o material com produtos de combustão, sendo amplamente utilizado em indústrias alimentícias e na soldagem de plásticos, mas raramente aplicado na metalurgia. O diferencial dessa tecnologia para as micro-ondas está na frequência e difusão das ondas. As micro-ondas possuem uma menor frequência, gerando ondas menos direcionais e com maior difusão (Yur'ev, et. al, 2018). Na Figura 24 tem-se ilustrado o equipamento de secagem utilizado para o aquecimento por SHF.

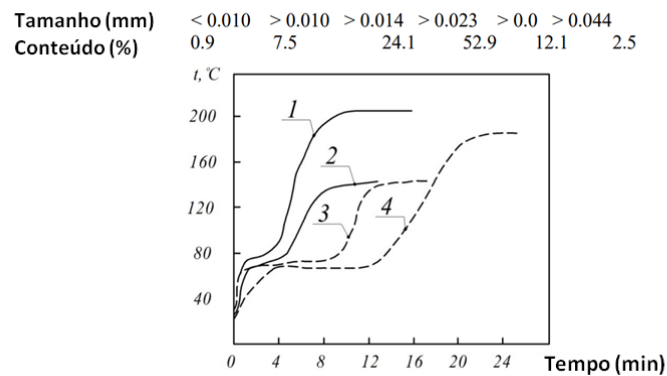
Figura 24 - Equipamento de secagem utilizado juntamente com o SHF.



Fonte: Adaptado de Yur'ev, et. al, 2018.

O estudo realizado por Yur'ev et. al. (2018) no contexto da secagem de concentrado de minério de ferro da planta de processamento Olenegorsk. O equipamento utilizado consistiu em um gerador de SHF de 650 W e 2.450 MHz, uma célula de aquecimento de quartzo em um container isolante e um sistema de medição de temperatura. As amostras, com umidade inicial variando entre 10% e 18%, foram submetidas a temperaturas entre 140 °C e 200 °C, com tempos isotérmicos de 5 minutos. A Figura 25 apresenta a umidade da amostra testada no estudo em função do tempo.

Figura 25 - Umidade da amostra em função do tempo.



Fonte: Adaptado de Yur'ev, et. al, 2018.

Os resultados indicaram que a secagem no campo SHF é significativamente mais eficiente que os métodos convencionais. Foi possível remover mais de 85% da umidade em apenas cinco minutos a 140 °C, com a umidade residual sendo $\leq 0,6\%$. A secagem foi rápida e uniforme, sem causar oxidação significativa do concentrado, mantendo assim sua pureza.

Os experimentos mostraram que a eficiência ideal foi obtida a 140 °C com um tempo de processo total não excedendo 15 minutos. O consumo energético foi baixo, com uma média de 0,1 MW·h/t para concentrados com 15% de umidade inicial.

Apesar da ótima eficiência alcançada com essa tecnologia em comparação com o sistema de secagem convectivo utilizado atualmente, assim como os outros artigos avaliados, ainda é necessário avaliar economicamente a implantação dessa tecnologia em uma escala industrial e seu retorno financeiro. Apesar das tecnologias utilizadas atualmente necessitarem de otimizações, ela ainda fornece uma qualidade adequada do produto final.

5.2.4. Secagem convectiva por chute de transferência

A tese “Secagem convectiva de concentrado de minério de ferro: Abordagem experimental e simulações por fluidodinâmica computacional de Souza (2023), estuda a secagem de minério de ferro utilizando simulações por Fluidodinâmica Computacional (CFD) para otimizar o processo em equipamentos industriais. O trabalho inicia com a caracterização físico-química do minério de ferro, destacando a presença de partículas finas e suas propriedades estruturais que influenciam o processo de secagem.

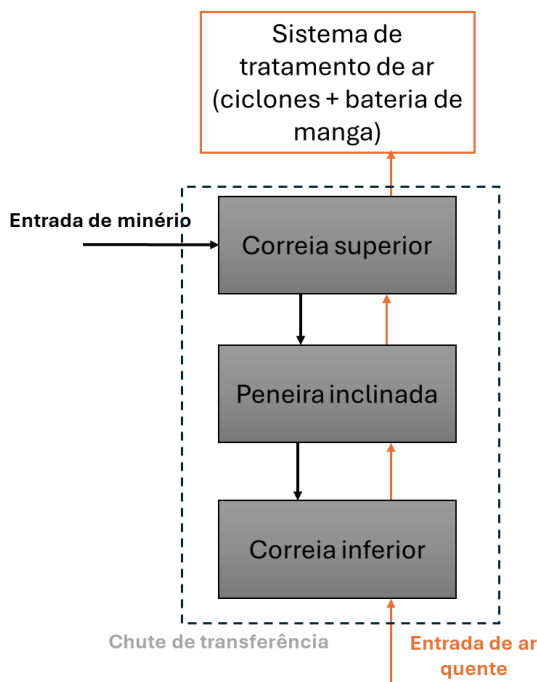
Como método do estudo foi realizado ensaios laboratoriais em estufa e leito fixo para analisar a cinética de secagem e determinar o impacto de variáveis como temperatura do ar, velocidade do fluxo e carga de sólidos. Os resultados revelaram que a resistência externa à transferência de massa é o principal fator limitante no processo de secagem e que a forma e a umidade inicial do minério influenciam diretamente na taxa de secagem (Souza, 2023).

O estudo avançou para simulações em escala laboratorial (equipamentos FB-2 e GR-1) e posteriormente em escala industrial no equipamento de secagem em chute. Foram obtidas correlações empíricas para o coeficiente de transferência de massa, aplicadas nas simulações por CFD, que se mostraram eficazes na previsão do comportamento do processo. As simulações indicaram que a otimização do fluxo de ar e o ajuste de variáveis operacionais podem melhorar a eficiência de secagem e reduzir o consumo energético. Além disso, o trabalho destacou os benefícios do uso de CFD para o projeto e aprimoramento de equipamentos de secagem na indústria de mineração, proporcionando maior controle sobre o processo e redução de custos operacionais (Souza, 2023).

O chute de secagem descrito na tese é uma adaptação de um chute de transferência convencional, utilizado originalmente para mudar a direção do fluxo de sólidos entre transportadores de correia. No modelo modificado, patenteado pela Vale S.A. em 2015, o chute foi convertido em uma unidade de secagem industrial através da introdução de ar quente na base do equipamento. Esse ar ascendente promove a troca de calor e massa com o minério úmido que cai pelo chute, resultando na redução da umidade do material (Souza, 2023). Na Figura 26, tem-se representado o funcionamento do equipamento chute adaptado

para secagem.

Figura 26 - Funcionamento do chute de secagem



Fonte: Adaptado de Souza, 2023.

No fluxograma, tem-se a entrada do minério pela correia superior, passando por uma peneira inclinada onde o minério é distribuído. Ao atravessar a peneira inclinada o minério é jogado para uma correia inferior. Pela correia inferior tem-se a entrada de um ar quente e seco que passa pelo chute no sentido contrário do fluxo do minério. Para o tratamento do ar, tem-se acoplado um sistema de tratamento que possui ciclones e uma bateria de manga (Souza, 2023).

A utilização da Fluidodinâmica Computacional (CFD) permitiu analisar o comportamento multifásico do escoamento, a transferência de calor e a eficiência da secagem. As simulações revelaram que regiões próximas às entradas de ar possuem maior eficiência de secagem devido à maior velocidade e temperatura do ar. Além disso, o uso da CFD possibilitou identificar pontos críticos de desgaste e sugerir melhorias no design do equipamento.

A principal vantagem do chute modificado é sua instalação em linhas de transporte já existentes, minimizando a necessidade de grandes alterações estruturais. Isso permite incorporar a etapa de secagem sem interromper significativamente o fluxo produtivo (Souza, 2023).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um dos maiores desafios na secagem de minério de ferro no Brasil é a busca por métodos que minimizem o impacto ambiental. No Brasil, as barragens já resultaram em grandes tragédias, devido a sua falta de estruturação e manutenção, como foi o caso de Brumadinho (MG) em 2019 e Mariana (MG) em 2015. Dessa forma, faz-se necessária a avaliação de novas tecnologias que gerem menos efluentes e causem menores impactos ambiental.

Diante desses desafios, algumas indústrias já utilizam outras técnicas de beneficiamento, a exemplo da Vale S.A. que utiliza o beneficiamento a seco no Complexo S11D, na cidade Canaã dos Carajás.

Atualmente, os recursos com alta qualidade do minério que não precisa de etapas de beneficiamento complexas estão se esgotando, havendo a necessidade de aprimorar as técnicas de beneficiamento para que se possa concentrar minérios com menor qualidade (Luz, 2010).

Assim, uma opção é a combinação desse método de beneficiamento a seco com outras tecnologias de concentração do minério, como a separação magnética, que pelos estudos analisados, é uma tecnologia atrativa e já aplicada industrialmente, principalmente em regiões onde os recursos são mais escassos. No estudo realizado por Amorim (2022), foi possível observar uma boa faixa de teor de ferro nas amostras passadas pelo sistema de beneficiamento magnético e recuperação em massa do minério, gerando poucos rejeitos e mínimo consumo em água e energia.

O estudo realizado por Jingfeng (2017), de beneficiamento do minério de ferro por meio de leito fluidizado apresentou boas faixas de concentração de minério de ferro e recuperação em massa do material. Porém, a utilização de equipamentos mais complexos e a limitação do estudo em ferro particulado grosso, faz com que seja necessário maior desenvolvimento de estudo nessa frente.

Por fim, o estudo de Rahbari (2018), de beneficiamento solar do minério de ferro, mostra uma frente ainda mais inovadora do uso da energia solar como alimentação de um sistema de trocadores de calor para a secagem do minério de ferro, atrelado com leitos fluidizados, alcançando ótimas faixas de redução de umidade. Entretanto, o estudo não se aprofunda sobre a qualidade final do minério beneficiado e os custos com o processo, tornando mais difícil a aplicação desse sistema em um contexto atual.

Sobre as novas tecnologias de secagem para os produtos de pellet feed e concentrado de minério citadas no presente trabalho, são tendências inovadoras e que podem ser aplicadas em um futuro. O equipamento de chute de transferência, estudado pela tese de Souza (2023),

apresenta maior aplicabilidade entre os estudos analisados, utilizando um método de secagem convectiva já patenteado pela Vale S.A. que possui a entrada de ar quente na base do equipamento, possibilitando a troca de calor com o minério por todo equipamento. O estudo entre os outros parece ser o mais aplicável por utilizar uma tecnologia já conhecida e apresenta a utilização de CFD que possibilita o aprimoramento dos equipamentos de secagem.

A tecnologia multiagente, apresentada no trabalho de Lomonos et. al. 2024, também utiliza uma secagem convectiva conhecida como o tambor de secagem, porém adicionando um sistema de controle preditivo de umidade. A utilização de um sistema de controle para predição de umidade do minério de ferro é interessante para obter um produto final com taxas de umidade desejadas para seu transporte e qualidade do produto. Porém é necessário avaliar se o custo econômico da aplicação de uma tecnologia como essa em uma planta de pelotização seria compensatório.

As tecnologias como micro-ondas e SHF ainda precisam de mais estudos e não parecem ser tão atrativas para o caso do minério de ferro, por esse produto não exigir uniformidade na secagem do *pellet* como outros produtos de secagem sensíveis a temperatura. Além disso, é necessário realizar estudos dessas tecnologias sobre sua aplicabilidade em uma escala industrial, além do fator econômico.

Como perspectivas futuras da abordagem de novas tecnologias no setor de beneficiamento e secagem do minério de ferro, é possível observar o crescente interesse nas indústrias em mudar o beneficiamento do minério de ferro a úmido para o beneficiamento a seco. A combinação desse método a seco com novas tecnologias como a separação magnética e beneficiamento térmico aliado com separador por leito fluidizado são bem aplicáveis e ótimas opções para a redução da produção de rejeitos pela indústria mineradora. A técnica mais aplicável entre essas está na separação magnética, por não envolver altos custos iniciais e já ser aplicada em alguns processos de mineradoras.

Sobre as tecnologias para a secagem dos produtos do minério de ferro, a adoção de formas de secagem além da convectiva ainda é um futuro distante. Além disso, a falta de estudos sobre essas tecnologias e o potencial elevado custo inicial desses equipamentos não parece tão interessante quanto a aplicabilidade da utilização de secadores rotativos, leitos fluidizados, entre outros.

Para estudos futuros, seria importante avaliar a combinação dessas tecnologias, convectivas e por micro-ondas, por exemplo, para alcançar mais efetividade no processo de secagem e maior qualidade no produto final. Além disso, os trabalhos necessitam de mais

dados sobre avaliação econômica do processo.

REFERÊNCIAS

AMORIM, Fernando Duarte; MARTINS, José Helvécio; NUNES, Aline Pereira Leita. **Processamento mineral a seco: testes em laboratório com minério de ferro de depósito no sudoeste do quadrilátero ferrífero.** *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 3, p. 21375-21398, mar. 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n3-372. Recebimento dos originais: 27 jan. 2022; Aceitação para publicação: 28 fev. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MINERAÇÃO (ABM). Relatório sobre sustentabilidade na mineração. Disponível em: www.abm.org.br. Acesso em: 21 jan. 2025.

BRITO, L. A.; COSTA, H. G. Inovações em sistemas de secagem: uma análise crítica. *Proceedings of Mineral Engineering*, 2021.

CHAEDIR, Benitta A.; KURNIA, Jundika C.; SASMITO, Agus P.; MUJUMDAR, Arun S. Advances in dewatering and drying in mineral processing. *Drying Technology: An International Journal*, v. 39, n. 11, p. 1667-1684, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1907754>.

Feng, Jx., Zhang, Y., Zheng, Hw. *et al.* Drying and preheating processes of iron ore pellets in a traveling grate. *Int J Miner Metall Mater* **17**, 535–540 (2010). <https://doi.org/10.1007/s12613-010-0354-0>

G1. Mais cara, mineração a seco é alternativa a barragens, apontam especialistas. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2019/02/01/mais-cara-mineracao-a-seco-e-alternativa-a-barragens-apontam-especialistas-entenda.ghtml>. Acesso em: 15/01/2025

GONÇALVES, P. A.; ALMEIDA, R. T. Eficiência energética na secagem de minério de ferro. *Journal of Mining Processes*, v. 15, n. 1, p. 22-35, 2019.

HAN, Hongliang; LU, Liming. Thermal beneficiation of refractory iron ore. In: **Iron Ore (Second Edition): Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability**. Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, 2022. p. 421-456.

HE, Jingfeng; LIU, Chengguo; XIE, Junqing; HONG, Pu; YAO, Yake. Beneficiation of coarse particulate iron ore by using a dry density-based fluidized bed separator. *Powder Technology*, v. 319, p. 346-355, set. 2017.

HOLMES, Ralph J.; LU, Yifan; LU, Liming. Introduction: Overview of the global iron ore industry. In: **Iron Ore (Second Edition): Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability**. Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, 2022. p. 1-56. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820226-5.00023-9>.

Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). (2024). Relatório Trimestral do Setor Mineral.

JANKOVIC, Aleksandar. Comminution and classification technologies of iron ore. In: **Iron Ore (Second Edition): Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability**. Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, 2022. p. 269-308. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820226-5.00013-6>.

KANTEMIROV, Valeriy Daniilovich; TITOV, Roman Sergeevich; YAKOVLEV, Andrey Mikhailovich. The main trends of development of the iron ore industry in Russia. *Известия Уральского государственного горного университета*, 2019, v. 2(54), p. 80-86. DOI: <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-2-80-86>.

KAWATRA, S. K.; CLAREMBOUX, V. Iron ore pelletization: Part I. Fundamentals. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, v. 43, n. 4, p. 529-544, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1897586>.

KONOKH, I. S.; ISTOMINA, N. M.; LOMONOS, A. I. Designing the predictive control of a drum dryer using multi-agent technology. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, v. 2024, n. 4, p. 12, 2024. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-4/12>.

LUZ, Adão B.; SAMPAIO, João A.; FRANÇA, Silvia C. A. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 965 p.: il. ISBN CDD 622.7.

Maycon Athayde, Mauricio Cota Fonseca & Bagatini Maurício Covcevich (2018): Iron ore pellet drying assisted by microwave: A kinetic evaluation, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, DOI: 10.1080/08827508.2017.1423295

MORAES, Sandra Lúcia de; LIMA, José Renato Baptista de; RIBEIRO, Tiago Ramos. Iron ore pelletizing process: An overview. In: **IntechOpen**. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.73164>. Acesso em: 20/01/2025.

MOURÃO, J. M. Guidelines for selecting pellet plant technology 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking-ICSTI, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, October 14–18, 2012 (2012), pp. 2162-2175

MUJUMDAR, A. S. Drying in mineral processing. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Handbook of Industrial Drying**. 3. ed. Cleveland: CRC Press, 2006. p. 898.

OLIVEIRA, M. F. Processos modernos de secagem de minérios. Editora Minerais do Brasil, 2018.

PHAM, Hai Thanh; Nhu, Dung Kim Thi; PHAM, Luan Van; PHAM, Nhung Thi; TRAN, Toi Trung; VU, Chinh Thi; TRAN, Thinh Duc. Short overview about iron ore beneficiation: a

case study in recovering the iron ore from the tailing pond of the Kip-Tuoc processing plant. *Journal of Mining and Earth Sciences*, v. 65, n. 4, p. 98-111, 2024.

Pickles, C.A. Microwaves in extractive metallurgy: Part 2 – A review of applications, *Minerals Engineering, Ontario*, v.22, p1112-p1118, 2009.

RAHBARI, Alireza; FONTALVO, Armando; PYE, John. Solar-thermal beneficiation of iron ore: System-level dynamic simulation and techno-economic optimisation. *Applied Thermal Engineering*, v. 223, p. 119794, 25 mar. 2023.

SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; LUZ, Adão Benvindo da. **Ensaios de separação magnética e eletrostática**. In: **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. CETEM/MCT, 2007.

SCHNEIDER, Claudio L.; MATIolo, Elves; NEUMANN, Reiner; GOMES, Otávio F. **M. Beneficiamento de minérios**. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM.

SILVA, J. R. et al. Tecnologias de secagem na indústria mineral. *Revista Brasileira de Engenharia de Minas*, v. 22, n. 3, p. 45-57, 2020.

ŚLEZAK, Marta; MIGAS, Piotr; BERNASOWSKI, Mikolaj. The use of microwave treatment as a sustainable technology for the drying of metallurgical sludge. *Materials*, v. 17, n. 24, p. 6207, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17246207>. Recebido em: 29 nov. 2024; Revisado em: 15 dez. 2024; Aceito em: 17 dez. 2024; Publicado em: 19 dez. 2024.

SOUZA, Amarílis Severino e. **Secagem convectiva de concentrado de minério de ferro: abordagem experimental e simulações por fluidodinâmica computacional**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Química) — Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, São Carlos, 2023. Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Béttega.

WONG, Guojing; FAN, Xiaohui; GAN, Min; JI, Zhiyun; CHEN, Xuling; TIAN, Zhiyuan; WANG, Zhuangzhuang. Improvement on the thermal cracking performance of pellets prepared from ultrafine iron ore. *Powder Technology*, v. 342, p. 873-879, 15 jan. 2019.

WU, Z. H.; HU, Y. J.; LEE, D. J.; MUJUMDAR, A. S.; LI, Z. Y. Dewatering and drying in mineral processing industry: Potential for innovation. *Drying Technology: An International Journal*, v. 28, n. 7, p. 834-842, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.490485>.

Yur'eva, B., Dudko, V., & Biakova, M. (2018). Application of Ecologically Clean Technology to Drying of Iron-Ore Pellets. *Solid State Phenomena*, 284, 828-832. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.284.828

ZHU, Deqing; PAN, Jian; LU, Liming; HOLMES, Ralph J. Iron ore pelletization. In: **Iron Ore (Second Edition): Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability**. Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, 2022. p. 539-578. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820226-5.00014-8>.