

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Departamento de Engenharia de Minas
Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais

MARCOS PAULO PAIVA

CLASSIFICAÇÃO E CONCENTRAÇÃO A SECO DO MINÉRIO DE FERRO:
Estudo Comparativo aos Contextos Geológicos de Carajás e Quadrilátero Ferrífero

BELO HORIZONTE

2025

MARCOS PAULO PAIVA

CLASSIFICAÇÃO E CONCENTRAÇÃO A SECO DO MINÉRIO DE FERRO:
Estudo Comparativo aos Contextos Geológicos de Carajás e Quadrilátero Ferrífero

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos à obtenção do título de Especialista em Engenharia de Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Luciano Fernandes Magalhães.

BELO HORIZONTE

2025



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

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

Aos vinte e oito dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e cinco, às 09h:20 , o estudante Marcos Paulo Paiva, matrícula 2023700749, defendeu o Trabalho intitulado “**CLASSIFICAÇÃO E CONCENTRAÇÃO A SECO DO MINÉRIO DE FERRO: Estudo Comparativo aos Contextos Geológicos de Carajás e Quadrilátero Ferrífero**”.

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

Nota: 92

Situação: Aprovado

Orientador: Professor Luciano Fernandes de Magalhães

Examinadora: Professora Andreia Bicalho Henriques

Examinadora: Professora Rísia Magriotis Papini



Documento assinado eletronicamente por **Luciano Fernandes de Magalhães, Professor(a)**, em 28/08/2025, às 10:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andreia Bicalho Henriques, Chefe de departamento**, em 28/08/2025, às 15:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rísia Magriotis Papini, Usuária Externa**, em 30/08/2025, às 09:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site



https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 4444930 e o código CRC B70A88F6.

INSTRUÇÕES

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

RESUMO

O beneficiamento de minério de ferro constitui uma etapa estratégica da cadeia produtiva mineral, sendo determinante para a qualidade do produto final, os custos operacionais e o atendimento às exigências ambientais. A crescente restrição ao uso de recursos hídricos, associada à necessidade de maior eficiência energética e redução de impactos ambientais, tem impulsionado o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias de classificação, concentração e pré-concentração a seco. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar e comparar métodos convencionais de classificação granulométrica e métodos inovadores de concentração e pré-concentração de minério de ferro operando a seco, considerando as particularidades geológicas e mineralógicas dos depósitos das regiões de Carajás, no estado do Pará, e do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.

A metodologia baseou-se em revisão bibliográfica técnica e científica, abrangendo livros clássicos de processamento mineral, artigos acadêmicos, relatórios institucionais e materiais técnicos de fabricantes de equipamentos. Adicionalmente, foi realizada uma análise comparativa qualitativa entre seis métodos: peneiras vibratórias, peneiras fixas e peneiras rotativas, representando os métodos convencionais de classificação granulométrica; separadores magnéticos de rolo de alta intensidade e separadores triboelétricos, aplicados à concentração mineral a seco; e sistemas de classificação por sensores (ore sorting), utilizados na etapa de pré-concentração. A comparação considerou critérios como faixa granulométrica de aplicação, eficiência operacional, consumo energético, viabilidade econômica, seletividade mineral, maturidade tecnológica e impacto ambiental.

Os resultados indicam que os métodos convencionais de classificação granulométrica apresentam elevada robustez operacional e ampla adaptabilidade, sendo mais adequados a cenários com maior heterogeneidade mineralógica, como no Quadrilátero Ferrífero. Em contrapartida, os métodos inovadores de concentração e pré-concentração a seco demonstraram desempenho superior em contextos geológicos mais homogêneos e com elevados teores de ferro, como os minérios de Carajás, possibilitando ganhos significativos de teor, redução da massa processada nas etapas subsequentes e diminuição do consumo de água.

Conclui-se que não existe uma tecnologia universalmente superior para o beneficiamento de minério de ferro a seco. A seleção do método mais adequado deve considerar a compatibilidade entre as características mineralógicas do minério, os objetivos do processo produtivo e as condições operacionais e econômicas da planta. Observa-se uma tendência à adoção de rotas híbridas, integrando métodos convencionais e tecnologias inovadoras, visando maximizar a eficiência operacional e atender às exigências de sustentabilidade da mineração moderna.

Palavras-chave: Classificação granulométrica; Beneficiamento a seco; Minério de ferro; Concentração mineral; Processamento mineral.

ABSTRACT

Iron ore beneficiation is a strategic stage of the mineral production chain, directly influencing product quality, operational costs, and compliance with environmental requirements. Increasing restrictions on water use, combined with the demand for higher energy efficiency and reduced environmental impacts, have driven the development and application of dry classification, concentration, and pre-concentration technologies. In this context, this study aims to analyze and compare conventional particle size classification methods with innovative dry concentration and pre-concentration technologies for iron ore, considering the geological and mineralogical characteristics of the Carajás deposits, in the state of Pará, and the Quadrilátero Ferrífero region, in Minas Gerais, Brazil.

The methodology was based on a technical and scientific literature review, including classical mineral processing textbooks, academic papers, institutional reports, and technical documentation from equipment manufacturers. In addition, a qualitative comparative analysis was conducted involving six beneficiation methods: vibrating screens, fixed screens, and rotary screens, representing conventional particle size classification methods; high-intensity roll magnetic separators and triboelectric separators, applied to dry mineral concentration; and sensor-based sorting systems (ore sorting), used in the pre-concentration stage. The comparison considered criteria such as particle size range, operational efficiency, energy consumption, economic feasibility, mineral selectivity, technological maturity, and environmental impact.

The results indicate that conventional particle size classification methods exhibit high operational robustness and broad adaptability, making them particularly suitable for scenarios characterized by greater mineralogical heterogeneity, such as the Quadrilátero Ferrífero. Conversely, innovative dry concentration and pre-concentration technologies demonstrated superior performance in more homogeneous geological contexts with high iron grades, such as the Carajás ores, enabling significant grade improvement, mass reduction in subsequent stages, and minimization of water consumption.

It is concluded that there is no universally superior technology for dry iron ore beneficiation. The selection of the most appropriate method must be based on the compatibility between ore mineralogical characteristics, production objectives, and the operational and economic conditions of the plant. The current trend points toward the adoption of hybrid processing routes that integrate conventional methods with innovative technologies to enhance operational efficiency and meet modern mining sustainability requirements.

Keywords: Particle size classification; Dry beneficiation; Iron ore; Mineral concentration; Mineral processing.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características Técnicas Gerais dos Métodos	33
Tabela 2 - Aplicabilidade dos Métodos no Quadrilátero Ferrífero e Carajás.....	34
Tabela 3 - Vantagens e Limitações Comparativas dos Métodos.....	35
Tabela 4 - Indicadores de Eficiência para Beneficiamento de Ferro.....	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa geológico simplificado da Província Mineral de Carajás	13
Figura 2 - Fluxograma simplificado do beneficiamento de minério de ferro de Carajás	14
Figura 3 - Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero	16
Figura 4 - Fluxograma do beneficiamento de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero	17
Figura 5 - Esquema técnico de peneira vibratória com dois decks	20
Figura 6 - Representação esquemática e real de grelha fixa (estacionária) utilizada na britagem primária.....	22
Figura 7 - Exemplo de peneira rotativa (trommel) utilizadas na classificação de minérios.....	24
Figura 8 - Esquema do funcionamento de um separador magnético de rolo de alta intensidade a seco. 26	
Figura 9 - Princípio de funcionamento de um separador triboelétrico por correia com eletrodos opostos.....	28
Figura 10 - Esquema de funcionamento de um sistema de ore sorting com sensores ópticos, XRT e NIR.	31

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	8
2.	OBJETIVOS	10
2.1.	Objetivo geral	10
2.2.	Objetivos específicos.....	10
3.	METODOLOGIA	11
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
4.1.	Minério de carajás (pa).....	12
4.2.	Minério do quadrilátero ferrífero (mg).....	15
4.3.	Métodos convencionais de classificação granulométrica.....	18
4.3.1.	Peneiras vibratórias.....	18
4.3.2.	Peneiras fixas	20
4.3.3.	Peneiras rotativas	22
4.4.	Métodos inovadores de concentração e pré-concentração à seco	24
4.4.1.	Separação magnética a seco com separadores de rolo de alta intensidade (concentração).....	24
4.4.2.	Separador triboeletrostático (concentração)	26
4.4.3.	Ore sorting - classificação por sensores (pré-concentração)	28
5.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	32
5.1.	Análise comparativa	32
5.2.	Discussão dos resultados	37
6.	CONCLUSÕES	40
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	42
	REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

O processamento de minério de ferro é uma das operações mais importantes para a indústria de mineração, sendo responsável pela geração de um dos principais produtos de exportação do Brasil. A busca por processos de beneficiamento mais eficientes e sustentáveis é uma necessidade crescente, impulsionada pela pressão para redução de custos operacionais e pelo aumento das exigências ambientais e de mercado (CORREIA; COUTO, 2018).

A classificação granulométrica dos minérios é uma etapa essencial do beneficiamento, pois promove a separação do material em diferentes faixas granulométricas, assegurando que o produto final atenda às especificações técnicas exigidas (CHAVES; PERES, 2012). Tradicionalmente, essa etapa é realizada por meio de métodos convencionais, como peneiras vibratórias, fixas ou rotativas. Contudo, o avanço tecnológico na indústria mineral tem viabilizado o uso de métodos inovadores, especialmente voltados à operação a seco, aplicáveis tanto às etapas de concentração mineral quanto de pré-concentração. Dentre esses métodos, destacam-se os separadores magnéticos de rolo de alta intensidade, como os do tipo RE-Roll (INBRAS, 2023), e o separador triboelétrico (TOMRA, 2020), ambos utilizados em processos de concentração mineral. Complementa-se a esse conjunto o sistema de classificação por sensores (*ore sorting*), que, embora não realize concentração mineral no sentido estrito, desempenha papel relevante na pré-concentração, por meio da remoção seletiva de material estéril com base em propriedades físico-químicas detectadas (METSO, 2023).

Além de ganhos em desempenho e na qualidade do produto, os métodos a seco representam uma estratégia relevante para a sustentabilidade das operações, uma vez que reduzem ou eliminam a necessidade de grandes volumes de água. Essa mudança implica menor geração de rejeitos, reduzindo os riscos associados à construção e à manutenção de barragens. Estudos recentes indicam que a adoção de sistemas a seco está diretamente associada ao aumento da recuperação de finos e à eliminação do uso de barragens (IBRAM, 2021), o que é especialmente importante em um contexto de escassez hídrica e crescente rigor ambiental.

Adicionalmente, a adoção de tecnologias a seco está alinhada às diretrizes internacionais de *Environmental, Social and Governance* (ESG), colaborando para uma mineração mais limpa, segura e resiliente. Nesse contexto, a correta seleção de rotas de processamento, considerando as especificidades físicas, químicas e mineralógicas dos

diferentes tipos de minério, revela-se fundamental para otimizar a eficiência global das operações e reduzir impactos socioambientais.

Nesse cenário, este estudo busca oferecer uma base técnica de apoio à tomada de decisão na escolha de tecnologias a seco para classificação granulométrica, concentração e pré-concentração de minério de ferro. Ao comparar diferentes métodos aplicáveis aos contextos geológicos de Carajás e do Quadrilátero Ferrífero, a pesquisa visa subsidiar práticas operacionais mais eficientes, sustentáveis e compatíveis com as realidades da mineração brasileira atual.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Analisar e comparar métodos convencionais de classificação granulométrica e métodos inovadores de concentração e pré-concentração de minério de ferro a seco, considerando as particularidades dos minérios das regiões de Carajás/PA e do Quadrilátero Ferrífero/MG, com foco em eficiência operacional, na viabilidade econômica e qualidade do produto.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Descrever o princípio de funcionamento, as vantagens e as limitações dos métodos de classificação granulométrica de minério de ferro a seco, com foco nas peneiras vibratórias, peneiras fixas e peneiras rotativas.
- Apresentar os principais métodos de concentração a seco, incluindo os separadores magnéticos de rolo de alta intensidade (RE-Roll) e o separador triboelétrico, além do método de pré-concentração por sensores, o sistema de *ore sorting*, abordando suas aplicações, benefícios e desafios operacionais.
- Analisar as características físicas e químicas dos minérios de ferro das regiões de Carajás e do Quadrilátero Ferrífero, relacionando essas propriedades com a eficiência dos diferentes métodos de classificação granulométrica, concentração e pré-concentração a seco.
- Realizar uma comparação entre os métodos de classificação granulométrica, concentração e pré-concentração, considerando desempenho operacional, consumo energético, custo de implementação e impacto ambiental.
- Propor rotas de beneficiamento a seco mais adequadas e sustentáveis para cada contexto geológico analisado.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido com base em um estudo de caráter qualitativo, fundamentado em revisão bibliográfica e análise comparativa de diferentes métodos de classificação granulométrica, concentração e pré-concentração de minério de ferro a seco. A abordagem visa identificar as vantagens operacionais e os critérios de aplicabilidade de cada tecnologia, considerando as particularidades geológicas das regiões de Carajás (PA) e Quadrilátero Ferrífero (MG).

A pesquisa foi estruturada em três etapas principais:

1. Levantamento bibliográfico – Coleta de informações em artigos científicos, livros técnicos, dissertações acadêmicas e catálogos de fabricantes e fornecedores de equipamentos (como Metso, Eriez, Tomra, STET e Inbras), abrangendo métodos convencionais de classificação granulométrica e métodos inovadores de concentração e pré-concentração a seco;
2. Caracterização dos minérios – Análise qualitativa das características físico-químicas dos minérios de ferro predominantes nas duas regiões estudadas, com base em dados secundários de fontes técnicas (VALE, DNPM, CETEM, IBRAM) que descrevem litotipos, teores, granulometria e propriedades magnéticas;
3. Análise comparativa – Elaboração de quatro tabelas comparativas com base nos dados obtidos, organizadas conforme os seguintes critérios:
 - Tabela 1 – Características Técnicas Gerais dos Métodos: construída com base em dados de fabricantes, literatura técnica e descrições operacionais consolidadas;
 - Tabela 2 – Aplicabilidade dos métodos no quadrilátero ferrífero e carajás: baseada na análise geológica de cada região e na compatibilidade entre mineralogia local e requisitos operacionais de cada tecnologia;
 - Tabela 3 – Vantagens e limitações comparativas: fundamentada em análises qualitativas extraídas da bibliografia, catálogos técnicos e estudos de caso industriais;
 - Tabela 4 – Indicadores de eficiência para beneficiamento de ferro: construída com base em parâmetros típicos de desempenho (eficiência de separação, ganho de teor, redução de massa), extraídos de artigos, estudos de *benchmarking* e informações disponibilizadas por fabricantes.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

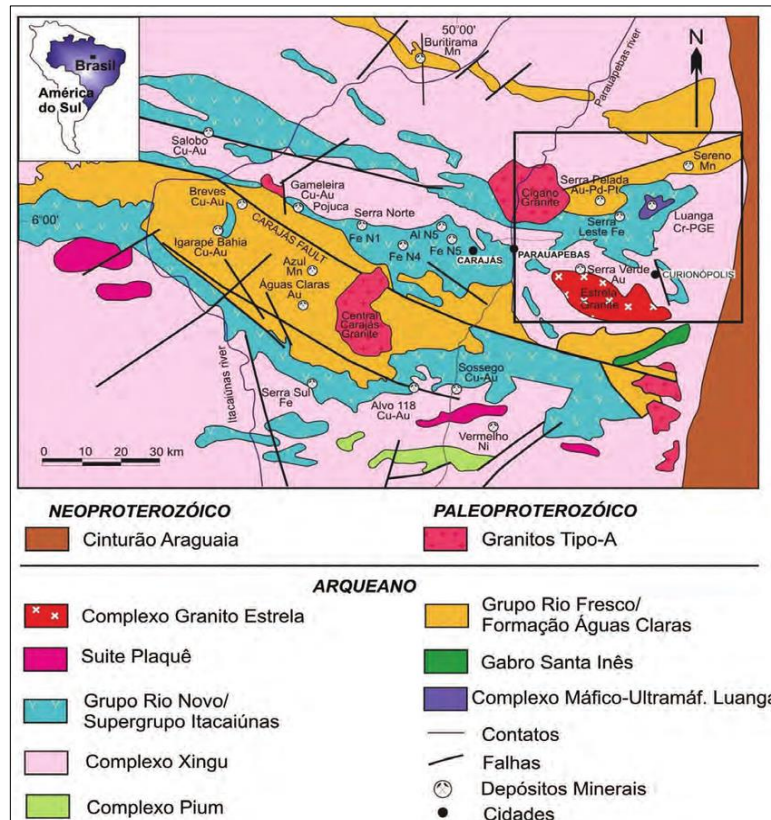
4.1. MINÉRIO DE CARAJÁS (PA)

A Província Mineral de Carajás, localizada no sudeste do estado do Pará, constitui uma das mais relevantes concentrações de minério de ferro de alto teor do mundo, sendo a principal base produtiva da Vale S.A. O distrito mineral abrange diversas serras, entre as quais se destacam Serra Norte (jazidas N4 e N5), Serra Sul (S11D) e Serra. Essas unidades geológicas são compostas predominantemente por jaspilito, uma rocha formada por hematita, jaspe ferruginoso e sílica (CPRM, 2016; DARDENNE; SCHOBENHAUS, 2001).

As ocorrências minerais em Carajás apresentam estruturação litológica diversa, refletida na presença de três principais tipos de minério: hematita dura (compacta), hematita semidura e hematita friável. A hematita dura possui estrutura maciça, elevada densidade e teor médio de ferro entre 66% e 67%, sendo tradicionalmente beneficiada por rotas convencionais. Já a hematita semidura apresenta textura bandeada com alternância de camadas de hematita e sílica, exigindo maior seletividade nos processos. A hematita friável, por sua vez, caracteriza-se pela baixa coesão entre partículas e granulometria fina, favorecendo seu tratamento por rotas a seco, com menor necessidade de cominuição e excelente desempenho em classificações por sensores e separação magnética (COSTA et al., 2020).

Conforme a Figura 1, é possível observar um mapa geológico simplificado da Província Mineral de Carajás, onde estão representadas as principais unidades litoestratigráficas e depósitos minerais, incluindo as jazidas de interesse deste estudo. O mapa evidencia a distribuição espacial das formações ferríferas, importantes para compreender as diferenças de mineralogia e, conseqüentemente, de aplicabilidade tecnológica nas rotas de classificação.

Figura 1 - Mapa geológico simplificado da Província Mineral de Carajás

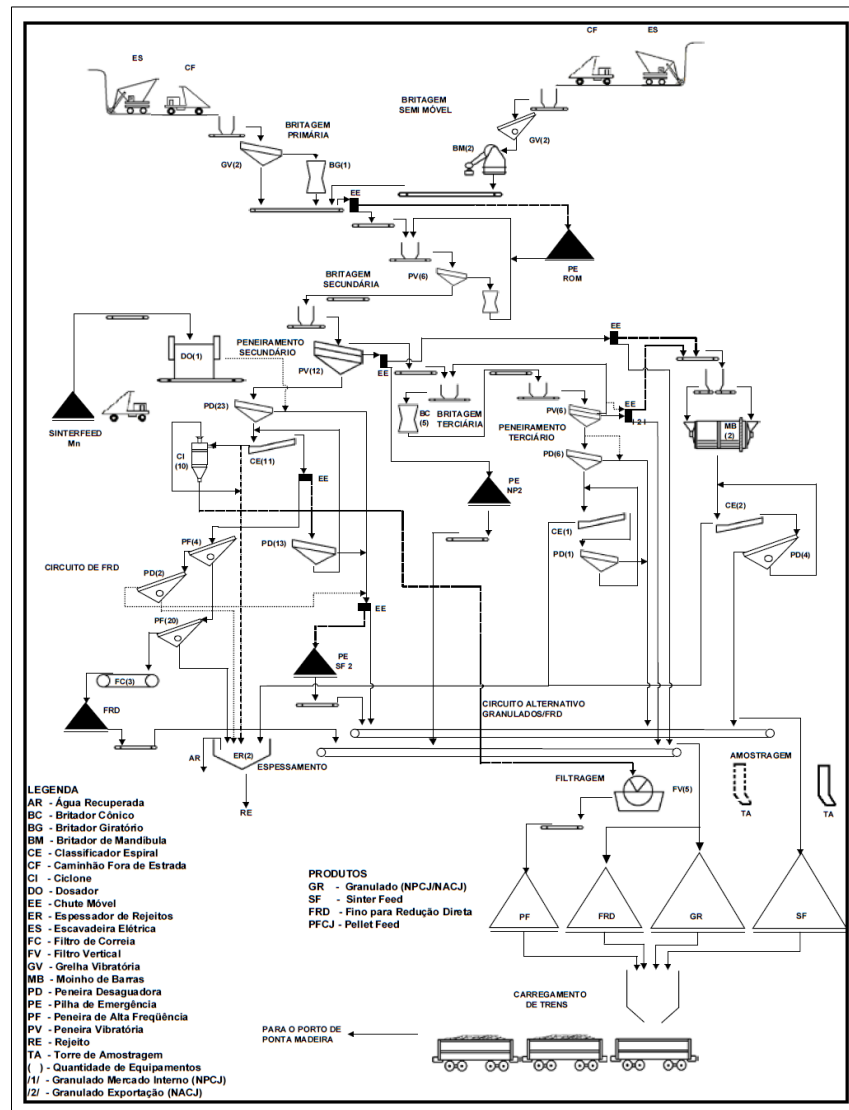


Fonte: Adaptado de DOCEGEO (1988) e MACHADO et al. (1988), conforme apresentado em DARDENNE; SCHOBENHAUS (2001).

A aplicação de rotas de beneficiamento a seco tem ganhado destaque na região, especialmente em projetos com minério friável. Um dos casos mais representativos é o Projeto S11D, considerado o maior empreendimento mineral do mundo com processamento inteiramente a seco. A planta industrial do S11D, localizada na Serra Sul, opera com britagem primária e peneiramento a seco, além de incorporar sistemas avançados de classificação por sensores ópticos (*ore sorting*) para pré-concentração, como XRT (transmissão de raio X) e NIR (infravermelho próximo). Essa abordagem elimina o uso de água, reduz o volume de rejeitos e aumenta a sustentabilidade das operações (VALE, 2023; METSO, 2022).

A Figura 2, apresentada a seguir, exibe um fluxograma simplificado do circuito de beneficiamento de minério de ferro utilizado na região de Carajás. Embora contenha etapas tradicionais, como espessamento e filtragem, a imagem ilustra claramente os pontos críticos de classificação granulométrica, como o peneiramento secundário e terciário, e permite visualizar em quais etapas a substituição por rotas a seco é tecnicamente viável.

Figura 2 - Fluxograma simplificado do beneficiamento de minério de ferro de Carajás



Fonte: CETEM (2001).

Embora o fluxograma apresentado na Figura 2 represente a rota convencional de beneficiamento adotada em operações da região, o presente trabalho também aborda tecnologias mais recentes e adaptadas ao contexto do beneficiamento a seco. Dentre essas rotas tecnológicas modernas, destacam-se as peneiras vibratórias de alta capacidade, os separadores magnéticos de rolo de alta intensidade (como o RE-Roll da Inbras-Eriez) e os sistemas automatizados de *ore sorting*. Tais métodos não estão explicitamente representados na imagem, mas são foco de análise neste estudo por sua aplicabilidade crescente, especialmente no tratamento de hematita friável. Esses equipamentos conferem seletividade, eficiência energética

e operam sem o uso de água ou reagentes químicos, alinhando-se às premissas de sustentabilidade e inovação no setor mineral (FRANÇA; LUZ, 2019).

As principais características que tornam o minério de Carajás ideal para tais processos incluem o teor de ferro elevado (variando entre 65% e 68%), a baixa concentração de impurezas (como sílica, fósforo e alumina), a granulometria relativamente homogênea e a alta susceptibilidade magnética. Tais atributos consolidam a província não apenas como um exemplo global de qualidade mineral, mas também como um ambiente geológico ideal para a aplicação de rotas de classificação e concentração a seco, com ganhos em eficiência, sustentabilidade e segurança operacional.

4.2. MINÉRIO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO (MG)

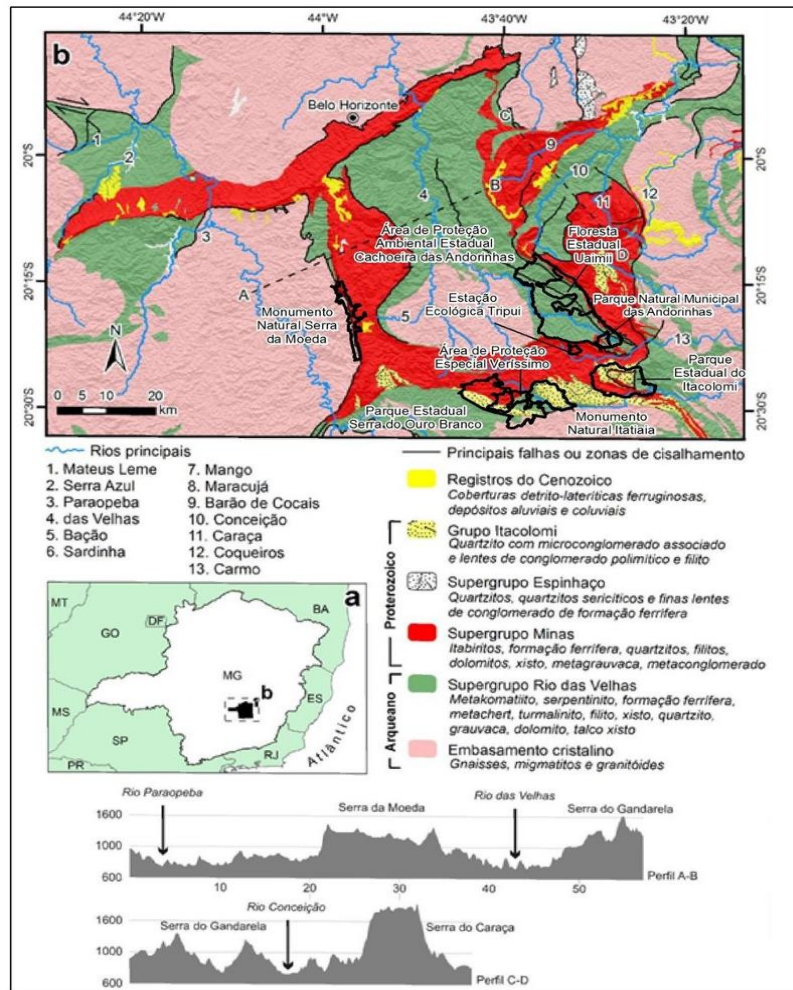
O Quadrilátero Ferrífero, localizado na região centro-sul de Minas Gerais, é uma das principais regiões produtoras de minério de ferro do Brasil e também uma das mais conhecidas mundialmente. A atividade mineradora na região possui grande relevância econômica e histórica, sendo responsável por uma parcela significativa da produção nacional de minério de ferro. Essa região se destaca, principalmente, pela diversidade e qualidade dos seus depósitos minerais, além de apresentar características geológicas que impactam diretamente nas estratégias e nas tecnologias aplicadas no beneficiamento do minério (ALKMIN; MARSHAK, 1998; DARDENNE; SCHOBENHAUS, 2001).

Do ponto de vista geológico, o Quadrilátero Ferrífero faz parte do Cráton do São Francisco, que é uma das unidades geológicas mais antigas do planeta. A formação das jazidas de minério de ferro dessa região ocorreu ao longo de bilhões de anos, envolvendo processos naturais como sedimentação, deformações estruturais e alterações químicas nas rochas. A principal unidade geológica responsável pela formação dos minérios de ferro é conhecida como Supergrupo Minas, onde se destaca a Formação Cauê. Essa formação é composta basicamente por itabiritos, que são rochas ricas em ferro, formadas por camadas alternadas de minerais de ferro, como hematita e magnetita, e sílica (CPRM, 2016; DARDENNE; SCHOBENHAUS, 2001).

Conforme demonstrado na Figura 3, é possível observar um mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero, que evidencia as principais unidades geológicas da

região, além da localização dos principais depósitos de minério de ferro. A visualização do mapa é essencial para entender como as diferentes formações geológicas estão distribuídas e como isso influencia na forma como o minério é explorado e processado nas operações mineradoras da região.

Figura 3 - Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero



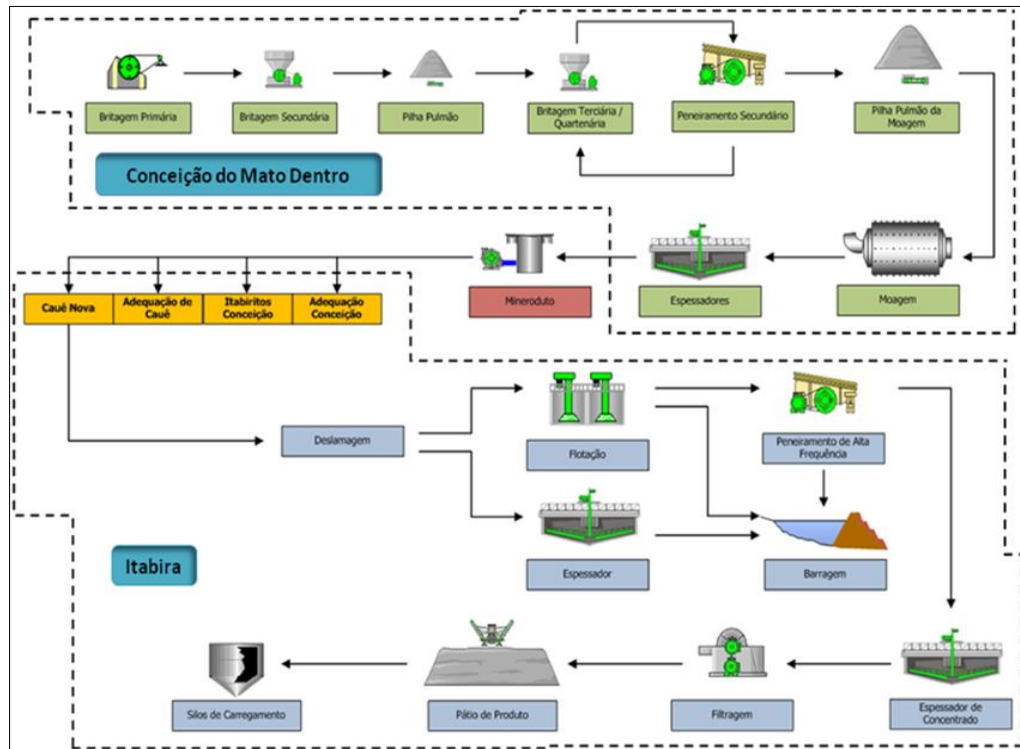
Fonte: Adaptado de ALKMIM; MARSHAK (1998) e CPRM (2016).

O minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero apresenta uma grande variação em suas características físicas e químicas. De maneira geral, os depósitos são compostos por diferentes tipos de itabirito, que podem variar desde materiais muito compactos e resistentes até materiais friáveis, de granulometria mais fina e menor coesão. Esse grau de variação impacta diretamente na escolha das rotas de beneficiamento adotadas nas plantas mineradoras. Itabiritos compactos, por exemplo, exigem processos de britagem e moagem mais intensos para que ocorra a liberação das partículas minerais. Já os itabiritos friáveis permitem processos menos agressivos

de cominuição, além de viabilizar, em muitos casos, o uso de rotas de beneficiamento a seco (COSTA et al., 2020).

Atualmente, o beneficiamento no Quadrilátero Ferrífero é majoritariamente realizado por meio de circuitos convencionais via úmida, combinando etapas de britagem, peneiramento, moagem, deslamagem e flotação catiônica reversa, seguidas de espessamento e filtragem para produção do concentrado. Esses processos são necessários devido à presença de contaminantes como sílica, fósforo e alumina, além da granulometria heterogênea do minério da região. A Figura 4 apresenta um fluxograma simplificado que ilustra essa rota de processamento tradicional, adotada em grande parte das operações mineradoras da região.

Figura 4 - Fluxograma do beneficiamento de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero



Fonte: Adaptado de GALERY; MAMEDE; PERES (2016).

Apesar do predomínio das rotas convencionais, observa-se na região um avanço na adoção de tecnologias que possibilitam o uso de métodos a seco, ao menos em etapas específicas do processo. Assim como ocorre em Carajás, este trabalho também analisa o potencial de aplicação de tecnologias mais modernas no Quadrilátero Ferrífero, como peneiras vibratórias de alta capacidade, separadores magnéticos de rolo de alta intensidade — como o

RE-Roll — e sistemas de *ore sorting*, baseados em sensores ópticos, infravermelhos ou de densidade. É importante destacar que esses métodos, embora não estejam representados no fluxograma da Figura 4, fazem parte do escopo deste estudo, uma vez que oferecem soluções alinhadas às tendências atuais de sustentabilidade e eficiência operacional, especialmente para o tratamento dos itabiritos friáveis (FRANÇA e LUZ, 2019; METSO, 2022).

As principais características que definem os minérios do Quadrilátero Ferrífero são teores de ferro geralmente variando entre 40% e 60%, presença significativa de contaminantes como sílica, alumina e fósforo, além de uma granulometria bastante heterogênea. Essas condições exigem processos de beneficiamento mais robustos e seletivos, porém também abrem oportunidades para a implementação de rotas de classificação e concentração a seco, principalmente quando se busca reduzir o consumo de água, os custos operacionais e os impactos ambientais associados à disposição de rejeitos. Dentro desse contexto, a análise comparativa realizada neste trabalho busca evidenciar quais tecnologias são mais adequadas ao perfil geológico da região e como podem ser aplicadas de forma eficiente nas operações atuais e futuras.

4.3. MÉTODOS CONVENCIONAIS DE CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA

4.3.1. PENEIRAS VIBRATÓRIAS

As peneiras vibratórias são amplamente utilizadas na indústria mineral como método convencional de classificação granulométrica a seco e a úmido, sendo um dos principais equipamentos de separação por tamanho de partícula. O processo de peneiramento consiste na passagem controlada de partículas por aberturas (malhas ou telas) de tamanhos específicos, promovendo a separação entre os materiais mais grossos (oversize) e os mais finos (undersize) (CHAVES e PERES, 2009).

O funcionamento das peneiras vibratórias baseia-se na aplicação de movimentos vibratórios sobre uma superfície com aberturas calibradas (telas). Esses movimentos, que podem ser circulares, lineares ou elípticos, são promovidos por motovibradores ou mecanismos excêntricos. A vibração induzida gera uma aceleração que facilita o transporte e a estratificação das partículas, promovendo sua classificação de acordo com o tamanho (SANTOS, 2014).

A separação ocorre de forma contínua, com o material alimentado na extremidade da peneira e sendo transportado por vibração sobre a tela. As partículas menores que a abertura da tela passam por ela, enquanto as maiores são deslocadas até o final do equipamento (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006).

Existem diversos modelos, sendo as principais peneiras vibratórias inclinadas, que geralmente operam em ângulos entre 15° e 25°, proporcionando alta capacidade de processamento; peneiras vibratórias horizontais, que utilizam vibração linear e são indicadas para materiais com maior teor de umidade; e peneiras de alta frequência, que operam com pequenas amplitudes e altas frequências, indicadas para separações em granulometrias finas.

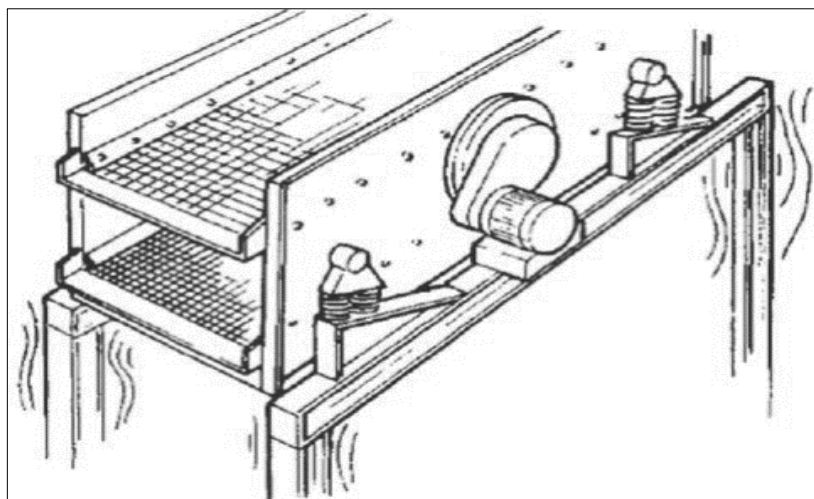
A escolha do tipo de peneira depende de fatores como granulometria do material, umidade, capacidade de produção e exigência de eficiência no corte (CHAVES, 2012). No contexto da classificação de minérios, as peneiras vibratórias apresentam uma série de qualidades operacionais que justificam sua ampla aplicação na indústria mineral, como alta eficiência de separação, especialmente em faixas granulométricas médias e grossas; grande capacidade de processamento, com modelos industriais capazes de operar com centenas de toneladas por hora; versatilidade operacional, podendo ser empregadas em diferentes etapas do beneficiamento, desde a britagem até o desaguamento de finos; e facilidade de manutenção e substituição de telas, reduzindo significativamente o tempo de parada e os custos operacionais.

Contudo, como qualquer equipamento industrial, as peneiras vibratórias também apresentam limitações técnicas que devem ser consideradas durante a seleção e dimensionamento do sistema. Entre as principais limitações estão a eficiência reduzida na separação de partículas muito finas (<150 µm), principalmente em operações a seco; o desgaste frequente das telas, exigindo intervenções regulares de manutenção preventiva ou corretiva; e a sensibilidade à presença de umidade no material, que pode causar entupimentos e comprometer o desempenho geral da classificação (GONÇALVES, 2015).

No beneficiamento de minério de ferro, as peneiras vibratórias são amplamente utilizadas para a classificação preliminar e desaguamento, além de operações de controle de tamanho de partícula nos circuitos de moagem e flotação. Também são aplicadas em plantas de britagem, separando os diferentes tamanhos de brita e preparando o material para as etapas subsequentes (ARAÚJO et al., 2021).

A Figura 5 ilustra um modelo esquemático de peneira vibratória com dois decks, evidenciando os componentes principais do equipamento, como o sistema vibratório, as telas de classificação e o mecanismo de apoio estrutural.

Figura 5 - Esquema técnico de peneira vibratória com dois decks



Fonte: Metso (2023).

4.3.2. PENEIRAS FIXAS

As peneiras fixas, também conhecidas como peneiras estacionárias ou grelhas fixas, são um método tradicional de classificação granulométrica grosseira largamente utilizado na indústria mineral. Elas operam com base na gravidade, sem o uso de movimento vibratório ou rotação, e são mais comuns nas etapas iniciais de britagem, para separar blocos muito grandes ou remover partículas finas antes de operações subsequentes (CHAVES, 2012).

O funcionamento das peneiras fixas baseia-se na queda livre de partículas sobre uma superfície inclinada com aberturas de tamanhos definidos, geralmente barras paralelas ou chapas perfuradas. À medida que o material desliza por essa superfície, as partículas com tamanho menor que os vãos passam pelas aberturas (passantes), enquanto as partículas maiores continuam no fluxo e são separadas como retidas (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

As peneiras fixas geralmente são instaladas com inclinações de 35° a 50°, o que facilita o escoamento do material apenas pela força da gravidade. Não possuem partes móveis, o que

reduz os custos de manutenção, mas também limita a eficiência na separação de partículas com granulometrias mais finas.

As peneiras fixas apresentam diferentes configurações construtivas, cada uma adaptada a condições operacionais específicas. Entre os principais tipos utilizados na indústria mineral estão as grelhas de barras paralelas, amplamente empregadas na britagem primária, compostas por perfis metálicos robustos e resistentes ao impacto de blocos de grande porte; as chapas perfuradas ou telas metálicas fixas, mais adequadas para cortes granulométricos intermediários, quando se deseja maior definição no processo; e as peneiras estáticas com canaletas, que possibilitam a separação do material passante em compartimentos distintos, otimizando o fluxo para as etapas subsequentes.

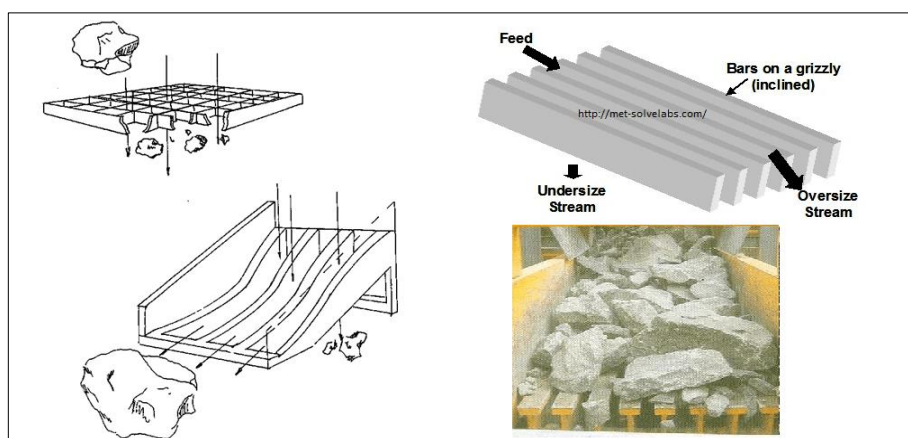
Quanto aos aspectos operacionais, esses equipamentos oferecem diversas vantagens em contextos de pré-classificação e escalpe. Entre os principais benefícios, podem ser citados o baixo custo de aquisição e manutenção, por dispensarem motorização e componentes móveis; a elevada resistência ao desgaste mecânico, sendo ideais para aplicações com materiais altamente abrasivos; a instalação e operação simplificadas, com reduzida necessidade de ajustes operacionais; e a capacidade elevada para lidar com material bruto, especialmente em circuitos de britagem primária.

Entretanto, algumas limitações operacionais devem ser consideradas na escolha do equipamento, como a baixa eficiência na separação de partículas finas, em virtude da ausência de movimento que favoreça a estratificação; a impossibilidade de controle preciso da malha de corte, o que reduz a seletividade do processo; a dependência exclusiva da gravidade, tornando sua aplicação limitada para materiais coesivos ou com alta umidade; e o risco de entupimento em materiais de formato irregular ou aderentes (GONÇALVES, 2015).

As peneiras fixas são muito utilizadas em circuitos de britagem primária, como etapa de pré-classificação, geralmente antes da alimentação do britador. Servem para remover partículas finas que não necessitam de britagem ou para proteger os britadores de sobrecarga, separando blocos incompatíveis com a câmara de britagem. Também são aplicadas como grelhas de desvio ou como primeira etapa de peneiramento em plantas com baixa exigência de precisão de corte (BRUCKS; ARAÚJO, 2016).

A Figura 6 ilustra o princípio de funcionamento de uma grelha fixa de escalpe, utilizada na britagem primária. O material alimentado é conduzido sobre uma estrutura inclinada composta por barras paralelas, onde ocorre a separação entre blocos de maior dimensão (retidos) e partículas menores que passam pelos vãos (passantes), seguindo diretamente para etapas posteriores do processo.

Figura 6 - Representação esquemática e real de grelha fixa (estacionária) utilizada na britagem primária.



Fonte: Adaptado de 911Metallurgist (2015).

4.3.3. PENEIRAS ROTATIVAS

As peneiras rotativas, também denominadas tambores rotativos ou trommels, são equipamentos amplamente utilizados na indústria mineral para a classificação granulométrica de materiais particulados. Seu princípio de funcionamento baseia-se na rotação de um tambor cilíndrico inclinado em torno de seu eixo longitudinal, permitindo a separação por tamanho a partir da movimentação e estratificação das partículas. São empregadas tanto em processos a seco quanto em operações úmidas, especialmente em etapas de pré-classificação e lavagem de materiais em plantas de beneficiamento (CHAVES, 2012).

A estrutura básica do equipamento compreende um cilindro metálico com malhas ou perfurações distribuídas ao longo de sua superfície, permitindo a passagem das partículas menores (passantes), enquanto as maiores seguem até o final do tambor (retidas), sendo descarregadas por gravidade. A classificação ocorre pela combinação entre a rotação, a inclinação do tambor e a ação da gravidade, promovendo o rolamento e o atrito entre as partículas, o que favorece sua separação (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

Quanto aos aspectos construtivos, destacam-se tambores com chapas perfuradas, comuns em separações médias e grossas; revestimentos internos com barras elevadoras, que aumentam a eficiência do desprendimento do material; e sistemas de lavagem por sprays internos, empregados em peneiramento úmido para remoção de finos aderidos. Além disso, esses equipamentos podem ser configurados com segmentos que apresentam diferentes aberturas ao longo do tambor, viabilizando múltiplos cortes granulométricos em uma única passagem.

Entre os principais pontos positivos da utilização das peneiras rotativas, destacam-se a elevada robustez e durabilidade, adequadas a ambientes com materiais abrasivos e alta umidade; a baixa geração de ruído e vibração, em virtude do movimento rotativo contínuo; a alta capacidade de operação com volumes expressivos e materiais com ampla heterogeneidade granulométrica; e o desempenho consistente em etapas de pré-classificação e lavagem.

Por outro lado, a utilização desse tipo de peneira pode apresentar algumas limitações, como a menor precisão nos cortes finos quando comparadas às peneiras vibratórias; a maior ocupação de espaço físico devido ao comprimento do tambor; o desgaste das telas internas quando submetidas a materiais altamente abrasivos; e a necessidade de controle rigoroso da rotação e da inclinação para evitar entupimentos e garantir estabilidade operacional (GONÇALVES, 2015).

Esses equipamentos são amplamente utilizados em plantas de minério de ferro, ouro, carvão e agregados, sobretudo na remoção de material estéril, separação de matéria orgânica e preparação granulométrica anterior a processos como moagem ou flotação (ARAÚJO et al., 2021). São particularmente indicados em operações que envolvem materiais argilosos ou muito úmidos, nos quais outras tecnologias de peneiramento apresentam restrições operacionais. A Figura 7 apresenta um modelo de peneira rotativa (trommel), ilustrando a estrutura cilíndrica perfurada e as telas intercambiáveis utilizadas na separação granulométrica de minérios em operações industriais contínuas.

Figura 7 - Exemplo de peneira rotativa (trommel) utilizadas na classificação de minérios.



Fonte: Adaptado de Beidou (2025).

4.4. MÉTODOS INOVADORES DE CONCENTRAÇÃO E PRÉ-CONCENTRAÇÃO À SECO

4.4.1. SEPARAÇÃO MAGNÉTICA A SECO COM SEPARADORES DE ROLO DE ALTA INTENSIDADE (CONCENTRAÇÃO)

A separação magnética a seco com separadores de rolo de alta intensidade é uma tecnologia consolidada para a classificação e concentração de minerais com diferentes suscetibilidades magnéticas, especialmente quando se busca evitar o uso de água nos processos de beneficiamento. Trata-se de um método amplamente utilizado na separação de minerais como hematita, ilmenita, granada, monazita, entre outros materiais paramagnéticos, presentes sobretudo em minérios de ferro de baixo teor.

O separador de rolo de alta intensidade consiste em um tambor giratório (rolo magnético), geralmente confeccionado com material não magnético, posicionado sob uma fonte de campo magnético intenso gerado por ímãs permanentes de terras raras ou eletroímãs de alta intensidade. O material, alimentado por gravidade ou por correia vibratória, passa próximo ao rolo onde é submetido à influência do campo magnético.

As partículas com maior suscetibilidade magnética são atraídas pela superfície do rolo e seguem sua rotação, sendo posteriormente removidas por sistemas raspadores (scrapers) ou sopradores de ar. Já as partículas não magnéticas não sofrem influência significativa do campo,

caindo por gravidade em compartimentos diferentes. O campo magnético pode ultrapassar 10.000 Gauss, tornando o equipamento eficaz mesmo para minerais fracamente magnéticos (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

Dentre as principais características técnicas desses separadores, destacam-se o campo magnético de alta intensidade, gerado por ímãs permanentes ou eletroímãs; a operação a seco, com controle ajustável da velocidade do rolo e da posição do alimentador; a capacidade de realizar até três separações simultâneas (altamente magnético, fracamente magnético e não magnético); e o controle fino da granulometria e da intensidade de campo, adaptando-se à natureza do minério processado (CHAVES, 2012).

Entre os aspectos positivos dessa tecnologia, observa-se a eliminação do uso de água e, conseqüentemente, das etapas subsequentes de desaguamento; a alta eficiência na separação de minerais paramagnéticos; a versatilidade de aplicação em faixas granulométricas variadas, especialmente entre 0,1 mm e 6 mm; e a manutenção simplificada, com menor complexidade operacional em comparação com separadores magnéticos via úmida.

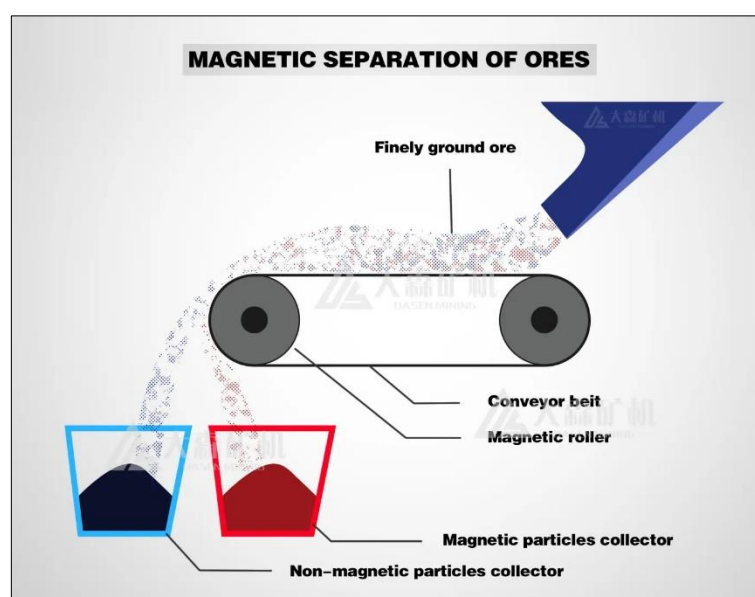
Entretanto, existem limitações que devem ser consideradas, como a redução significativa da eficiência quando aplicados a partículas muito finas ($<0,1$ mm), devido à força magnética relativa menor; a sensibilidade a variações no fluxo de alimentação e na umidade do material, que pode gerar aglomeração e comprometer a seletividade da separação; e a maior geração de poeira durante a operação, exigindo sistemas de exaustão ou enclausuramento ambiental adequado.

A separação magnética a seco com rolo de alta intensidade é largamente aplicada no beneficiamento de minérios de ferro de baixo teor, sobretudo na etapa de pré-concentração em processos a seco, como nos projetos de classificação mineral nas regiões de Carajás (PA) e no Quadrilátero Ferrífero (MG). Também é utilizada na purificação de matérias-primas não metálicas, como quartzo, feldspato e areia industrial.

No Brasil, empresas como a Inbras-Eriez desenvolveram equipamentos adaptados à realidade mineralógica local, como o separador magnético RE-Roll, que atua na recuperação de minerais magnéticos de alta e média susceptibilidade, com comprovada eficiência na concentração de hematita especular e granadas em granulometrias finas e secas (FRANÇA e LUZ, 2019).

A Figura 8 apresenta um esquema ilustrativo do princípio de funcionamento de um separador magnético de rolo de alta intensidade operando a seco. O minério finamente moído é alimentado sobre uma correia transportadora, passando por um rolo magnético que atrai partículas magnéticas. As partículas não magnéticas seguem sua trajetória natural, sendo coletadas separadamente, o que permite a classificação eficaz do material.

Figura 8 - Esquema do funcionamento de um separador magnético de rolo de alta intensidade a seco.



Fonte: Adaptado de Dasen Mining (2025).

4.4.2. SEPARADOR TRIBOELETROSTÁTICO (CONCENTRAÇÃO)

A separação triboelétrica é um método inovador de classificação de partículas com base na diferença de comportamento elétrico dos minerais ao entrarem em contato com outras superfícies ou entre si. Esse processo pertence à classe das separações eletrostáticas e opera a seco, sendo especialmente útil na separação de minerais com propriedades elétricas distintas em granulometrias finas e ambientes onde a utilização de água não é viável. Os separadores triboelétricos vêm sendo estudados e aplicados com sucesso em processos de beneficiamento de minérios como feldspato, quartzo, calcita, fosfato, barita, talco e até mesmo minérios de ferro (KOROBOV et al., 2006).

A separação triboelétrica baseia-se no fenômeno físico conhecido como eletrificação por fricção (ou triboeletrização), no qual partículas de diferentes minerais adquirem cargas

elétricas opostas ao entrarem em contato e se friccionarem com superfícies condutoras, dielétricas ou entre si. Após a eletrificação, essas partículas são submetidas a um campo elétrico intenso gerado entre dois eletrodos (geralmente planos ou cilíndricos), sendo então desviadas para diferentes coletores conforme a polaridade e magnitude da carga adquirida.

O processo inicia com a alimentação do material seco e com granulometria controlada, que passa por uma câmara de triboeletrificação, onde ocorre a fricção controlada. Em seguida, as partículas carregadas eletricamente entram na região entre os eletrodos onde o campo elétrico de alta tensão (geralmente entre 20 kV e 50 kV) atua, separando as partículas positivas e negativas por atração ou repulsão, conforme suas cargas.

Entre as principais características técnicas, destacam-se o fato de o equipamento não utilizar água ou reagentes químicos, sendo ideal para regiões com restrição hídrica; a aplicabilidade em granulometrias finas, com maior eficiência entre 75 e 600 μm ; a presença de uma câmara de fricção (*tribocharger*) e de um sistema de coleta seletiva de produtos carregados positivamente e negativamente; e o campo elétrico gerado por fonte de alta tensão, com controle preciso da intensidade e polaridade. Entre os modelos mais conhecidos, destaca-se o separador triboelétrico desenvolvido pela empresa americana Separation Technologies LLC, que opera com altas taxas de alimentação, chegando a até 40 t/h, e tem sido aplicado na produção de cimento, carvão limpo e fosfato beneficiado (STET, 2019).

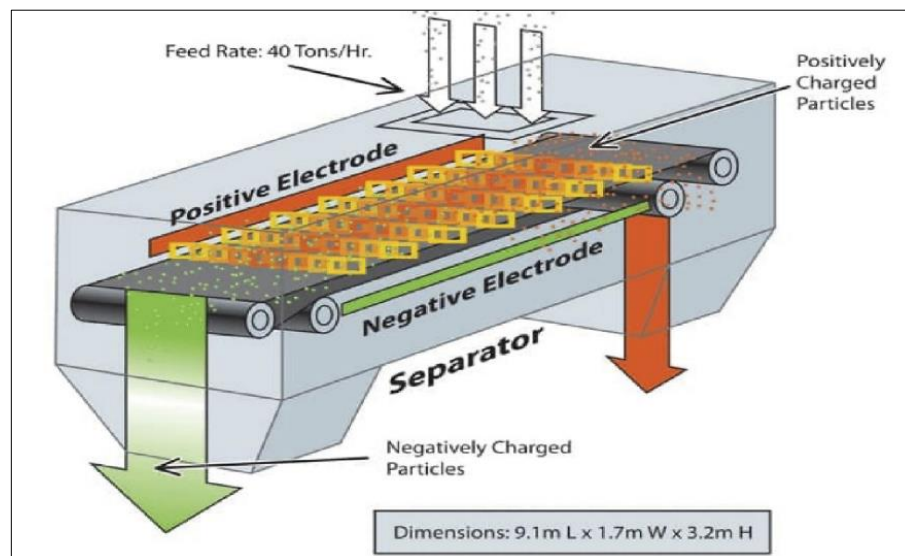
Dentre os aspectos positivos dessa tecnologia, observa-se a eliminação do consumo de água, o que reduz os impactos ambientais, a alta seletividade na separação de minerais com diferentes afinidades elétricas, a compatibilidade com materiais finos e ultrafinos, que são de difícil tratamento em métodos convencionais, e o baixo custo operacional contínuo, com manutenção simplificada e processo inteiramente automatizado. Por outro lado, existem algumas limitações que precisam ser consideradas, como a sensibilidade à umidade do material e do ar, que pode comprometer a eficiência da eletrificação; a necessidade de preparação adequada das superfícies das partículas, pois impurezas podem interferir na carga; a eficiência reduzida em materiais com diferenças sutis de triboafinidade; e o investimento inicial elevado, associado à complexidade dos sistemas de controle e isolamento elétrico.

Na mineração, os separadores triboelétricos têm sido aplicados com sucesso em projetos de separação de minerais de sílica e alumínio (como feldspato e caulim), na purificação de quartzo para fins industriais, na produção de cimento com adição de materiais finos e até na

recuperação de frações ricas em ferro de minérios finos rejeitados. A tecnologia apresenta potencial para aplicação em circuitos de beneficiamento de minério de ferro a seco, especialmente no contexto brasileiro, onde a busca por processos sustentáveis vem se intensificando nos últimos anos (ARAÚJO et al., 2021).

A Figura 9 ilustra com precisão o funcionamento de um separador triboelétrico industrial por correia. As partículas alimentadas são eletricamente carregadas por atrito, adquirindo cargas opostas conforme sua composição mineralógica. Durante o transporte em uma correia dielétrica, essas partículas passam por uma zona entre dois eletrodos de alta tensão (positivo e negativo). Como resultado, elas são defletidas eletrostaticamente em direções opostas, permitindo sua coleta seletiva em compartimentos distintos, com base na afinidade elétrica de cada fase mineral.

Figura 9 - Princípio de funcionamento de um separador triboelétrico por correia com eletrodos opostos.



Fonte: Adaptado de ST Equipment & Technology (2025).

4.4.3. ORE SORTING - CLASSIFICAÇÃO POR SENSORES (PRÉ-CONCENTRAÇÃO)

A técnica conhecida como *ore sorting*, ou classificação de minério por sensores, representa uma das abordagens mais modernas e tecnológicas aplicadas no beneficiamento mineral a seco. Trata-se de um processo automatizado e seletivo, voltado à etapa de pré-

concentração, cuja função principal é promover a remoção de material estéril antes das etapas convencionais de concentração. Este método não realiza concentração mineral no sentido estrito, mas sim uma separação preliminar que visa reduzir a massa a ser processada, aumentar o teor da alimentação e, conseqüentemente, otimizar o desempenho das etapas subsequentes.

O processo inicia com a alimentação do minério britado e previamente classificado por tamanho, normalmente entre 10 mm e 150 mm, dependendo do tipo de sensor empregado. O material é distribuído em uma correia transportadora de alta velocidade, passando individualmente por uma estação de detecção equipada com sensores que identificam características como densidade atômica, cor, brilho, composição elementar, resposta à radiação, entre outras. Entre os principais diferenciais do processo de *ore sorting*, destaca-se a utilização de sensores avançados, capazes de identificar propriedades físicas e químicas dos fragmentos minerais com alta precisão. Dentre os sensores mais empregados nesse tipo de sistema estão as câmeras RGB e NIR (infravermelho próximo), utilizadas para detectar variações de cor, brilho e umidade superficial; os sensores de fluorescência e transmissão de raios X (XRF e XRT), aplicados na avaliação da composição elementar e da densidade atômica; os espectrômetros de infravermelho por imagem hiperespectral (HSI), eficazes na identificação mineralógica superficial; e os sensores de indução eletromagnética (EM), utilizados na detecção de metais condutivos presentes na matriz mineral.

Uma vez detectado o fragmento que atende aos critérios de rejeito ou produto, o sistema de controle aciona válvulas pneumáticas ou atuadores mecânicos em milissegundos, desviando seletivamente o fragmento para o compartimento correspondente. Essa classificação ocorre em tempo real, com altíssima precisão e rendimento contínuo (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

Do ponto de vista técnico, os sistemas de *ore sorting* apresentam características específicas que os tornam altamente eficientes na pré-concentração. Entre essas características, destacam-se a operação contínua com elevadas taxas de processamento, variando entre 10 e 400 t/h por unidade; a detecção em tempo real e integração automática com sistemas de rejeição pneumática ou mecânica; a versatilidade quanto à escolha e combinação de sensores, permitindo personalização conforme a mineralogia do depósito; e a necessidade de granulometria controlada e de apresentação individualizada do material na correia transportadora, para garantir precisão na leitura.

Empresas como a Metso, referência mundial em tecnologias para mineração, oferecem sistemas comerciais de *ore sorting* baseados em sensores XRT (transmissão de raio-X), integrados a fluxos de britagem e classificação. Conforme divulgado pela própria Metso (2023), os seus sistemas são projetados para remover rejeitos estéreis ainda na britagem primária, resultando em economia de energia, reagentes, água e desgaste dos equipamentos subsequentes. Dentre os principais benefícios associados à tecnologia de *ore sorting*, observam-se a total independência do uso de água, sendo uma alternativa ideal para regiões com restrição hídrica; a redução significativa da massa a ser processada nas etapas subsequentes, resultando em menor consumo energético e menor desgaste dos equipamentos; a melhoria do teor médio da alimentação (ROM), a partir da exclusão precoce de fragmentos estéreis; a possibilidade de reprocessamento de pilhas de rejeito, viabilizando a recuperação de frações metálicas residuais; e a elevada seletividade e automação, com rápido retorno sobre o investimento em plantas de médio e grande porte.

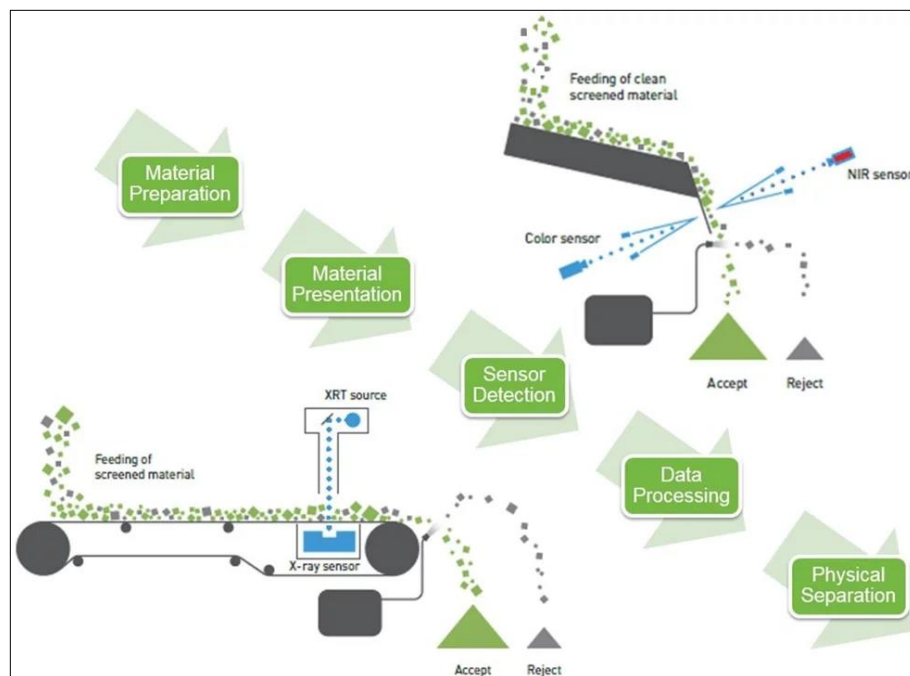
Por outro lado, algumas limitações devem ser consideradas para o uso eficaz da tecnologia, como o investimento inicial elevado, devido à complexidade da instrumentação e da automação envolvida; a necessidade de alimentação com fragmentos bem individualizados e livre de finos aderentes, o que exige controle rigoroso da britagem e peneiramento anterior; o desempenho sensível à homogeneidade mineralógica, à granulometria e à distinção física entre minério e ganga; e a inaplicabilidade em minérios cuja diferenciação física ou química entre os constituintes seja insuficiente para os sensores disponíveis.

A aplicação de *ore sorting* tem crescido exponencialmente na indústria de minérios metálicos, com destaque para projetos em minério de ferro, cobre, tungstênio, ouro e diamantes. Em operações de minério de ferro, como nas minas da Vale em Carajás (PA) e em estudos piloto no Quadrilátero Ferrífero (MG), o uso da pré-concentração por sensores já demonstrou aumentos expressivos na qualidade do produto final, na redução de custos operacionais e na melhoria da eficiência dos processos de concentração subsequentes.

A empresa Metso, conforme materiais disponíveis em seu site institucional, apresenta soluções de *sensor-based ore sorting* com *layout* modular e integração aos sistemas de controle da planta. Os esquemas ilustrativos da Metso mostram a disposição dos sensores sobre a correia, o painel de controle e os módulos de ejeção, exemplificando o funcionamento do sistema em plantas reais de britagem e pré-concentração.

A Figura 10 apresenta um fluxograma esquemático do sistema de classificação de minérios por sensores (*ore sorting*), destacando suas principais etapas operacionais. O processo se inicia com a preparação e apresentação do material em correias ou chutes, seguido pela detecção por sensores que podem ser ópticos, de raio X (XRT), infravermelho próximo (NIR) ou de cor. Com base nas informações obtidas, o sistema processa os dados em tempo real e executa a separação física do material, classificando automaticamente os produtos aceitáveis e os rejeitos.

Figura 10 - Esquema de funcionamento de um sistema de ore sorting com sensores ópticos, XRT e NIR.



Fonte: Adaptado de Metso (2025).

Os sensores representados na imagem possuem diferentes princípios de atuação. O sensor de raio X (XRT) identifica variações na densidade atômica dos materiais, permitindo distinguir minerais com diferentes composições. O sensor óptico por cor detecta diferenças de tonalidade superficial entre partículas, útil em minérios com contraste visual claro. Já o sensor NIR (infravermelho próximo) analisa características espectrais da luz refletida, sendo eficaz na identificação de materiais com diferentes propriedades químicas. A combinação desses sensores, associada a algoritmos de decisão em tempo real, permite uma separação altamente seletiva e eficiente, mesmo em granulometrias médias e finas.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. ANÁLISE COMPARATIVA

Com base na fundamentação teórica apresentada nos capítulos anteriores, bem como nas particularidades dos minérios explorados nas regiões do Quadrilátero Ferrífero (MG) e de Carajás (PA), procedeu-se à elaboração de um conjunto de tabelas comparativas com o objetivo de sintetizar e confrontar os principais aspectos técnicos e operacionais dos métodos de classificação, concentração e pré-concentração mineral analisados neste trabalho. A abordagem adotada permite uma avaliação criteriosa das diferentes tecnologias, agrupando-se os métodos em dois blocos, sendo o primeiro composto pelos métodos de classificação granulométrica convencionais, representados pelas peneiras vibratória, fixa e rotativa, e o segundo formado pelos métodos inovadores, que englobam os separadores magnéticos de rolo e triboelétrico, ambos aplicados à concentração mineral, além do sistema de classificação por sensores (*ore sorting*), empregado na etapa de pré-concentração.

As tabelas foram estruturadas de modo a contemplar, de forma progressiva, as principais variáveis envolvidas na escolha e aplicação desses métodos em plantas de beneficiamento a seco. Inicialmente, são descritas suas características técnicas gerais, seguidas de uma análise de aplicabilidade específica para os dois principais polos de produção de minério de ferro no Brasil. Em seguida, apresentam-se os principais pontos fortes e limitações de cada método e, por fim, indicadores quantitativos de desempenho relacionados à eficiência de recuperação, ao ganho de teor e à redução de massa processada.

Essa abordagem visa oferecer uma visão integrada dos métodos estudados, subsidiando discussões técnicas mais profundas e futuras decisões quanto à adoção de tecnologias em novos projetos de beneficiamento ou na otimização de plantas existentes.

A Tabela 1 apresenta um panorama geral das características técnicas dos seis métodos de classificação, concentração e pré-concentração avaliados. Essas informações são fundamentais para contextualizar as capacidades operacionais, limitações físicas e requisitos de processo de cada equipamento, permitindo uma primeira comparação entre métodos convencionais (peneiras) e métodos inovadores (baseados em propriedades físicas e químicas).

Tabela 1 - Características Técnicas Gerais dos Métodos

Método	Tipo de Operação	Meio	Faixa Granulométrica	Capacidade e (t/h)	Consumo de Energia	Grau de Complexidade
Peneira Vibratória	Classificação	Seco/ Úmido	100 µm – 100 mm	Alta	Médio	Médio
Peneira Fixa	Classificação	Seco	50 mm – 400 mm	Alta	Baixo	Baixo
Peneira Rotativa	Classificação	Seco/ Úmido	5 mm – 150 mm	Média/Alta	Médio	Médio
Separação Magnética de Rolo	Concentração	Seco	0,1 mm – 6 mm	Média	Médio/Alto	Alto
Separador Triboelétrico	Concentração	Seco	75 µm – 600 µm	Média	Alto	Alto
<i>Ore Sorting</i> (Sensores)	Pré-Concentração	Seco	10 mm – 150 mm	Média/Alta	Alto	Muito Alto

Fonte: Adaptado de Wills & Napier-Munn (2006), Chaves (2012), CETEM (2021) e Metso (2023).

Nota-se que os métodos inovadores, voltados para a concentração e pré-concentração a seco, operam exclusivamente sem o uso de água e apresentam maior seletividade, embora demandem maior investimento e controle operacional. Já os métodos convencionais de classificação granulométrica apresentam maior robustez, capacidade e simplicidade, sendo amplamente empregados nas primeiras etapas do beneficiamento.

Observa-se também que as peneiras vibratórias e fixas apresentam faixas granulométricas ideais mais amplas, sendo altamente eficientes para materiais médios a grossos. A peneira rotativa, embora com menor precisão no corte, apresenta grande adaptabilidade para materiais com alta heterogeneidade granulométrica e teores elevados de umidade superficial. Entre os métodos inovadores, a separação magnética de rolo e o separador triboelétrico são mais indicados para frações finas. Já o *ore sorting* é direcionado para granulometrias mais grossas, atuando com elevada precisão na remoção de ganga durante a etapa de pré-concentração, que antecede os processos convencionais de concentração mineral.

A Tabela 2 compara a aplicabilidade dos métodos nas duas principais regiões mineradoras do Brasil: o Quadrilátero Ferrífero (MG) e Carajás (PA).

Tabela 2 - Aplicabilidade dos Métodos no Quadrilátero Ferrífero e Carajás

Método	Aplicação no QF	Aplicação em Carajás	Observações Específicas
Peneira Vibratória	Sim	Sim	Boa performance para materiais friáveis
Peneira Fixa	Sim	Sim	Preferida para ROM de granulometria grossa
Peneira Rotativa	Limitada	Sim	Boa para minérios com lama superficial
Separação Magnética de Rolo	Sim	Sim	Alta eficiência na concentração de finos e pré-concentração
Separador Triboelétrico	Sim	Em testes	Sensível à umidade residual
<i>Ore Sorting</i> (Sensores)	Limitada	Sim	Ótimos resultados para hematita/laterita; pré-concentração eficiente

Fonte: Adaptado de CETEM (2021), Chaves (2012), França & Luz (2019), Metso (2023).

Percebe-se que, de forma geral, os métodos de classificação granulométrica, como peneiras vibratórias, fixas e rotativas, mostram boa adaptabilidade em ambas as regiões, sendo consolidados operacionalmente nas etapas iniciais de beneficiamento. Entretanto, a eficiência e os ganhos operacionais dos métodos de concentração, como a separação magnética de rolo e o separador triboelétrico, bem como dos métodos de pré-concentração, como o *ore sorting*, são fortemente impactados pelas características mineralógicas locais.

Em Carajás, onde predominam minérios de hematita de alto teor, friáveis e de maior homogeneidade, as tecnologias inovadoras apresentam desempenho superior. Equipamentos como o *ore sorting*, por exemplo, encontram grande aplicabilidade devido à facilidade de distinção ótica e densitométrica entre minério e ganga. O mesmo se observa na aplicação do separador triboelétrico, que vem sendo testado com bons resultados para separação de hematita de impurezas.

Por outro lado, no Quadrilátero Ferrífero, apesar de a separação magnética de rolo ser amplamente utilizada devido à presença de itabiritos e hematitas especulares, observa-se limitação na aplicação de tecnologias como o *ore sorting*, dada a maior complexidade mineralógica e menor contraste físico entre minério e ganga. Ainda assim, a peneira vibratória se mantém altamente eficiente, sobretudo no processamento de materiais friáveis, e a peneira

fixa segue como uma alternativa robusta e de baixo custo para ROMs de granulometria grosseira.

A seguir, na Tabela 3 são apresentadas as principais vantagens e limitações de cada método.

Tabela 3 - Vantagens e Limitações Comparativas dos Métodos

Método	Principais Vantagens	Principais Limitações
Peneira Vibratória	Alta capacidade; versatilidade	Problemas com materiais muito finos/úmidos
Peneira Fixa	Baixo custo; robustez	Baixa eficiência de corte
Peneira Rotativa	Ideal para materiais heterogêneos	Grande ocupação de espaço
Separação Magnética de Rolo	Alta recuperação magnética; processo seco	Alto custo de manutenção de rolos
Separador Triboelétrico	Separação de ultra-finos sem água	Sensibilidade à superfície e umidade
<i>Ore Sorting</i> (Sensores)	Redução de massa; alta precisão na remoção de estéril	Alto investimento; sensível a granulometria e à diferenciação física/química

Fonte: Adaptado de Araújo et al. (2021), Chaves (2012), Metso (2023), França & Luz (2019).

A partir desta análise, observa-se que as peneiras vibratórias oferecem elevada capacidade e versatilidade operacional, embora apresentem dificuldades na separação de materiais muito finos ou com alta umidade. As peneiras fixas são reconhecidas pela robustez e baixo custo, porém têm como desvantagem a baixa eficiência de corte. A peneira rotativa, por sua vez, destaca-se na manipulação de materiais heterogêneos e argilosos, sendo ideal para minérios com lama superficial, embora apresente grande ocupação de espaço físico.

Em relação aos métodos de concentração e pré-concentração a seco, verifica-se que a separação magnética de rolo possui elevada capacidade de recuperação magnética, sendo altamente eficaz na concentração de frações finas. Em alguns contextos, também pode ser utilizada como etapa de pré-concentração, embora sua principal função seja a concentração mineral. Apesar de sua alta eficiência, este método demanda alto custo de manutenção, principalmente devido ao desgaste dos rolos magnéticos. O separador triboelétrico, por sua vez,

destaca-se pela capacidade de realizar separações ultrafinas sem a necessidade de água, característica relevante em cenários de restrição hídrica, embora seja sensível à umidade e à condição superficial das partículas. Já o *ore sorting*, que se configura como uma tecnologia de pré-concentração, apresenta notável eficiência na redução de massa e na melhoria do teor, mas com custo de investimento elevado e elevada sensibilidade à granulometria e às características físico-químicas do material processado.

A Tabela 4 sintetiza os principais indicadores de desempenho estimados para os métodos analisados, considerando parâmetros como eficiência de recuperação, ganho de teor e redução de massa.

Tabela 4 - Indicadores de Eficiência para Beneficiamento de Ferro

Método	Eficiência de Recuperação (%)	Ganho de Teor Esperado (%)	Redução de Massa (%)
Peneira Vibratória	85-90	0-5	10-20
Peneira Fixa	70-80	0-3	5-10
Peneira Rotativa	80-85	0-4	10-15
Separação Magnética de Rolo	80-95	5-10	20-40
Separador Triboelétrico	70-85	4-8	10-30
<i>Ore Sorting</i> (Sensores)	85-95	8-12	20-50

Fonte: Adaptado de estudos de Araújo et al. (2021), França & Luz (2019), Metso (2023) e estimativas técnicas da literatura especializada.

Observa-se que os métodos inovadores de concentração e pré-concentração, especialmente o *ore sorting* e a separação magnética de rolo, apresentam os melhores resultados quando o objetivo é maximizar o teor de ferro e reduzir significativamente a massa a ser processada nas etapas subsequentes. Essa redução corresponde à diminuição do volume processado, obtida por meio da exclusão seletiva de partículas não aproveitáveis, seja por diferença de granulometria, propriedades físicas ou composição química. O *ore sorting*, por

exemplo, permite ganhos de teor da ordem de 8% a 12%, além de reduzir a massa em até 50%, o que representa um ganho operacional expressivo, sobretudo em operações que buscam eficiência logística e energética.

Por outro lado, os métodos de classificação granulométrica, como peneiras vibratórias, fixas e rotativas, mantêm alta eficiência na recuperação, porém com baixos ganhos de teor, sendo mais indicados para etapas de controle granulométrico e preparação do material. As peneiras fixas, embora apresentem menor eficiência de recuperação e ganho de teor, continuam sendo uma alternativa robusta e econômica para operações de escalpe ou separação inicial de ROM de granulometria grosseira.

Entretanto, é fundamental ressaltar que a adoção dos métodos inovadores deve ser cuidadosamente avaliada quanto à viabilidade econômica e às características mineralógicas de cada jazida. Nos casos de Carajás, a aplicação dessas tecnologias é altamente viável, dado o perfil mineralógico homogêneo e de alto teor. Já no Quadrilátero Ferrífero, a maior heterogeneidade dos minérios exige um estudo mais criterioso, que frequentemente leva à adoção de fluxos híbridos, integrando métodos convencionais e inovadores para otimização dos resultados.

5.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A comparação entre os métodos de classificação granulométrica, os métodos de concentração mineral e os métodos de pré-concentração, apresentada nas tabelas anteriores, revela um amplo espectro de possibilidades tecnológicas para otimizar o aproveitamento de minérios de ferro nas principais regiões mineradoras do Brasil. Contudo, a aplicação efetiva de cada método depende de uma série de fatores contextuais que extrapolam as eficiências teóricas e os dados de projeto dos equipamentos, exigindo uma análise mais criteriosa das condições operacionais, das características mineralógicas e dos objetivos produtivos de cada unidade (CHAVES, 2012).

No caso do Quadrilátero Ferrífero (MG), onde predominam os itabiritos com alta heterogeneidade mineralógica e granulométrica, os métodos de classificação granulométrica, como peneiras vibratórias, fixas e rotativas, bem como a separação magnética de rolo de alta intensidade, seguem sendo os mais aplicáveis. Isso ocorre devido à sua robustez frente a

materiais com variações abruptas de composição e textura, além da adequação à infraestrutura já consolidada nas plantas da região. Nesse contexto, a elevada presença de minerais contaminantes, como sílica, fósforo e alumina, associada à distribuição granulométrica mais complexa, limita a eficiência de processos baseados em sensores ou propriedades elétricas, tornando os métodos convencionais de classificação granulométrica mais seguros e consistentes.

As tecnologias baseadas em sensores e propriedades elétricas, como o *ore sorting*, que se configura como uma tecnologia de pré-concentração, e o separador triboelétrico, aplicado à concentração a seco, enfrentam maiores restrições técnicas, principalmente em razão da baixa diferenciação física entre ganga e minério em diversos tipos de itabiritos, o que compromete a acurácia dos sensores ópticos, espectrais ou de densidade. Além disso, a presença de minerais com superfícies oxidadas, texturas heterogêneas ou elevada porosidade pode gerar falsos positivos ou negativos na detecção, impactando diretamente na eficiência do processo. Outro fator crítico é a granulometria do ROM (*Run of Mine*), visto que os sensores exigem alimentação com material bem classificado, livre de finos e de agregação, o que nem sempre é viável operacionalmente nas plantas da região sem significativos investimentos em infraestrutura de britagem e peneiramento.

Por outro lado, em Carajás, onde os depósitos apresentam minérios mais homogêneos e com teores elevados de ferro, frequentemente superiores a 64% Fe, há um cenário muito mais favorável à adoção de tecnologias inovadoras. A elevada pureza mineralógica, com predominância de hematita friável de baixa contaminação, proporciona condições ideais para a aplicação de *ore sorting* em etapas de pré-concentração. Este método permite não apenas a redução de massa alimentada às etapas subsequentes, mas também ganhos significativos no teor de ferro, redução de custos operacionais e aumento da produtividade global da planta.

Além disso, a combinação entre alta seletividade mineral, baixo teor de contaminantes e granulometria mais uniforme favorece a utilização eficiente de sensores ópticos, de raio-X (XRT) e espectrometria hiperespectral, proporcionando classificações mais precisas. Soma-se a isso o fato de que o layout moderno das plantas em Carajás, associado a uma topografia mais plana e à disponibilidade de maior espaço físico, facilita a implementação de equipamentos de grande porte e linhas de produção automatizadas. Essa realidade contrasta diretamente com os desafios encontrados no Quadrilátero Ferrífero, onde limitações geográficas, ocupação do espaço físico e estruturas antigas muitas vezes inviabilizam a adoção plena dessas tecnologias.

Adicionalmente, é importante destacar que, mais do que as características do minério, fatores como a maturidade tecnológica da planta, a disponibilidade de recursos financeiros e a capacitação da equipe técnica exercem papel determinante no sucesso de implementação desses métodos. O alto custo de aquisição, calibração e manutenção de sistemas triboelétricos ou de sensores inteligentes ainda representa um entrave para sua ampla adoção, sobretudo em plantas de médio e pequeno porte, ou em empresas com perfil de operação mais conservador.

Outro ponto crítico a ser considerado diz respeito aos riscos operacionais associados à adoção de tecnologias altamente sensíveis a variáveis externas, como umidade, granulometria e homogeneidade da alimentação. Em ambientes de elevada variabilidade mineralógica, como ocorre em alguns depósitos do Quadrilátero Ferrífero, oscilações nas características do ROM podem gerar queda abrupta na eficiência dos sensores ou nos sistemas eletrostáticos, além de elevar custos operacionais com manutenções corretivas e ajustes frequentes (ARAÚJO et al., 2021).

Portanto, a escolha do método ideal não deve ser pautada apenas nos indicadores de eficiência isolados, mas sim em um equilíbrio criterioso entre desempenho técnico, viabilidade econômica, capacidade de integração com a infraestrutura existente e alinhamento com as metas ambientais e sociais da empresa. Nos próximos anos, a tendência mais clara no setor será a integração entre métodos convencionais de classificação granulométrica, como peneiras vibratórias e rotativas, e tecnologias de concentração a seco, como separação magnética de rolo e separação triboelétrica, além de métodos de pré-concentração, como o *ore sorting*. Essa abordagem híbrida visa a criação de circuitos capazes de extrair o máximo potencial de cada jazida, respeitando suas peculiaridades geológicas, operacionais e logísticas.

Essa estratégia de integração não só permitirá maximizar a recuperação e o teor de ferro, como também atenderá às crescentes demandas por sustentabilidade, eficiência energética e redução do consumo de água, fatores cada vez mais decisivos na competitividade da indústria mineral global. A capacidade de adaptar fluxos de processo, combinar tecnologias e realizar ajustes operacionais constantes será, portanto, um dos principais diferenciais das operações mineradoras no cenário atual e futuro.

6. CONCLUSÕES

A presente pesquisa permitiu uma análise técnica comparativa entre seis métodos aplicáveis em plantas de beneficiamento a seco de minério de ferro, sendo três voltados à classificação granulométrica, que são as peneiras vibratórias, peneiras fixas e peneiras rotativas, dois direcionados à concentração mineral, que são os separadores magnéticos de rolo de alta intensidade e os separadores triboelétricos, e um aplicado à pré-concentração, que corresponde aos sistemas de classificação por sensores, conhecidos como *ore sorting*. A partir da avaliação criteriosa das características operacionais, das eficiências metalúrgicas, das vantagens e limitações de cada técnica, foi possível compreender de forma objetiva os contextos em que cada uma delas apresenta melhor desempenho, com foco específico nas realidades mineralógicas e operacionais das regiões do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, e de Carajás, no Pará.

Os métodos convencionais de classificação granulométrica demonstraram-se mais adequados às condições operacionais do Quadrilátero Ferrífero, região caracterizada por minérios de teor mais variável, elevada heterogeneidade granulométrica e maior complexidade mineralógica. Neste cenário, tecnologias tradicionais de peneiramento, como peneiras vibratórias e fixas, associadas à separação magnética de alta intensidade, seguem sendo alternativas eficientes, robustas e economicamente viáveis, especialmente devido à sua menor sensibilidade às variações do minério e à compatibilidade com a infraestrutura consolidada das plantas locais.

Por outro lado, as tecnologias de concentração e pré-concentração mostraram-se especialmente promissoras para aplicação na província mineral de Carajás, cuja homogeneidade mineral, altos teores de ferro e baixa presença de contaminantes favorecem a adoção de sistemas automatizados, seletivos e energeticamente mais eficientes. Nesse contexto, equipamentos como *ore sorting*, aplicado à pré-concentração, e separadores magnéticos de alta intensidade, empregados na concentração, têm se mostrado decisivos na obtenção de ganhos operacionais expressivos, possibilitando tanto a redução significativa da massa alimentada às etapas subsequentes quanto a elevação dos teores de ferro no produto final.

Além dos fatores técnicos e mineralógicos, a viabilidade de implantação das tecnologias analisadas demonstrou ser fortemente condicionada por aspectos operacionais e econômicos, como disponibilidade hídrica, maturidade tecnológica da planta, custo de aquisição e

manutenção dos equipamentos, bem como pela qualificação da mão de obra disponível. Dessa forma, a tendência observada no setor mineral brasileiro aponta para a adoção crescente de circuitos híbridos, que combinam métodos convencionais de classificação granulométrica com tecnologias modernas de concentração e pré-concentração, buscando maximizar os ganhos metalúrgicos, otimizar a eficiência operacional e reduzir os impactos ambientais das operações.

Conclui-se, portanto, que não existe um método universalmente superior. As escolhas tecnológicas devem ser baseadas na compatibilidade com o perfil mineralógico de cada jazida, nos objetivos específicos do processo produtivo e nas condições estruturais e econômicas de cada unidade de beneficiamento. O avanço contínuo das tecnologias aplicadas à mineração, aliado ao aprofundamento dos estudos técnicos e regionais, será determinante para a expansão de soluções mais seletivas, sustentáveis e economicamente competitivas, alinhadas às demandas da indústria mineral contemporânea e aos desafios ambientais e operacionais do futuro.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A análise desenvolvida ao longo deste trabalho evidenciou que há múltiplas possibilidades para o aprofundamento dos estudos sobre métodos de classificação granulométrica, concentração e pré-concentração a seco aplicados ao beneficiamento de minério de ferro. Nesse contexto, surgem oportunidades relevantes que podem ser exploradas por pesquisadores, profissionais da indústria mineral e instituições acadêmicas, visando o aprimoramento contínuo do conhecimento técnico e operacional, especialmente no cenário da mineração brasileira.

Uma primeira sugestão consiste na realização de estudos voltados para a simulação e modelagem matemática de circuitos híbridos, que integrem métodos convencionais e inovadores em diferentes arranjos operacionais. A construção de modelos preditivos, capazes de simular o comportamento metalúrgico e energético desses circuitos, permitirá avaliar sinergias entre os equipamentos, otimizar fluxogramas e embasar decisões tanto do ponto de vista técnico quanto econômico.

Outra vertente promissora reside na caracterização mineralógica avançada de minérios provenientes de jazidas marginais, particularmente no Quadrilátero Ferrífero, que ainda carecem de estudos aprofundados quanto à aplicabilidade de tecnologias como o *ore sorting*, voltado à pré-concentração, e a separação triboelétrica, empregada na concentração de frações ultrafinas. A compreensão detalhada dos parâmetros físico-químicos e mineralógicos desses depósitos é fundamental para avaliar a viabilidade técnica da adoção de métodos a seco em contextos de maior heterogeneidade mineral.

Além disso, recomenda-se a condução de análises de viabilidade econômica, energética e ambiental mais abrangentes, considerando não apenas a eficiência metalúrgica dos processos, mas também indicadores de sustentabilidade, como balanços energéticos, emissão de particulados, uso de recursos hídricos, geração de resíduos sólidos e redução de impactos associados ao uso de recursos naturais. Estudos desta natureza serão essenciais para fortalecer a aderência das práticas minerárias às diretrizes ESG e às exigências de licenciamento ambiental cada vez mais rigorosas.

Por fim, destaca-se a importância de fomentar pesquisas aplicadas à automação, à digitalização e à utilização de inteligência artificial nos processos de classificação, concentração

e pré-concentração a seco. Investigações que envolvam o desenvolvimento de algoritmos para calibragem autônoma de sensores, sistemas de controle preditivo e análise de dados em tempo real, bem como a integração desses processos com plataformas de monitoramento remoto, poderão representar um avanço significativo em termos de produtividade, segurança operacional e sustentabilidade das operações mineradoras.

REFERÊNCIAS

- 911METALLURGIST. *Static Grizzly Screen as a Rock Separator*. 2015. Disponível em: <https://www.911metallurgist.com/blog/static-grizzly-screen-as-a-rock-separator/>. Acesso em: 21 abr. 2025.
- ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. Transpressional tectonics and preservation of core complexes in the southern portion of the Araçuaí-West Congo Orogen, Brazil. *Precambrian Research*, v. 90, p. 29-58, 1998.
- ARAÚJO, A. C.; VASCONCELOS, P. L.; SILVA, M. R. *Beneficiamento mineral: operações unitárias*. 3. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2021.
- BEIDOUU. *What is Trommel Screen and How Does It Work?*. 2025. Disponível em: <https://www.beidouu.com/construction/what-is-trommel-screen-and-how-does-it-work.html>. Acesso em: 21 abr. 2025.
- BRUCKS, G.; ARAÚJO, A. C. *Manual de operações unitárias em processamento mineral*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2016.
- CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL. *Introdução ao tratamento de minérios*. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001. 248 p.
- CHAVES, A. P. *Tratamento de minérios*. 5. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. *Introdução ao tratamento de minérios*. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2009.
- CORREIA, A. F.; COUTO, A. B. *Processos de beneficiamento de minérios*. 4. ed. Belo Horizonte: Editora ABC, 2018.
- COSTA, F. A.; MOREIRA, A. C.; SILVA, M. L. Caracterização mineralógica de minérios friáveis de Carajás e implicações para rotas a seco. *Revista Matéria*, v. 25, n. 3, 2020.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. *Mapa geológico da Província Mineral de Carajás*. Brasília: CPRM, 2016a.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. *Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero*. Brasília: CPRM, 2016b.
- DARDENNE, M. A.; SCHOBENHAUS, C. *Metalogênese do Brasil*. Brasília: CPRM, 2001. 392 p.
- DASEN MINING. *Dry Separation Ilmenite Permanent Magnetic Separator*. 2025. Disponível em: <https://dasenmining.com/pt/product/dry-separation-ilmenite-permanent-magnetic-separator/>. Acesso em: 21 abr. 2025.
- DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. *Sumário mineral brasileiro 2018*. Brasília: DNPM, 2018.

FRANÇA, S. M.; LUZ, A. B. Aplicação de separadores magnéticos RE-Roll no processamento de minérios de ferro. *Boletim Técnico da Inbras-Eriez*, 2019.

FRANÇA, S. C.; LUZ, A. B. Concentração magnética de alta intensidade a seco: avanços e aplicações em minérios de ferro brasileiros. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, v. 8, n. 3, p. 14–21, 2019.

GALERY, R.; MAMEDE, C. R. S.; PERES, A. E. C. Flotação catiônica reversa de minério de ferro na presença de cátions Ca^{2+} . *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 69, n. 1, p. 7-12, 2016.

GONÇALVES, R. M. Classificação granulométrica de minérios: eficiência e aplicabilidade industrial. *Revista Brasileira de Engenharia de Minas*, v. 3, n. 2, p. 45–52, 2015.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. *Gestão e manejo de rejeitos da mineração: desafios e melhores práticas*. Brasília: IBRAM, 2021. Disponível em: <https://ibram.org.br>. Acesso em: 12 mar. 2025.

INBRAS. *Separadores magnéticos RE-Roll: equipamentos de alta intensidade para separação a seco*. Inbras-Eriez Equipamentos Magnéticos. Disponível em: <https://www.inbras.com.br/produtos/separadores-re-roll>. Acesso em: 21 abr. 2025.

KOROBOV, M.; YUZHASHYAN, S.; OGORODNIKOV, D. Dry triboelectrostatic separation of mineral particles: a review. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, v. 40, p. 27–42, 2006.

METSO. *Ore sorting and sensor-based solutions for sustainable mining: catálogo técnico*. 2023. Disponível em: <https://www.metso.com>. Acesso em: 21 abr. 2025.

METSO. *Sensor-based ore sorting solutions*. 2022. Disponível em: <https://www.metso.com>. Acesso em: 21 abr. 2025.

METSO. *Service tips: peneiras, grelhas e alimentadores vibratórios*. 2023. Disponível em: <https://www.metso.com/pt/insights/blog/mineracao-e-metais/service-tips-peneiras-grelhas-e-alimentadores-vibratorios/>. Acesso em: 21 abr. 2025.

SANTOS, E. R. Peneiramento industrial: aplicações, tipos e seleção de equipamentos. *Revista Minérios & Mineraleis*, n. 366, p. 40–47, 2014.

ST EQUIPMENT & TECHNOLOGY. *Triboelectrostatic belt separator*. 2025. Disponível em: <https://steqtech.com/separators/>. Acesso em: 21 abr. 2025.

STET – SEPARATION TECHNOLOGIES LLC. *Tribo-electrostatic belt separator for minerals: technical bulletin*. 2019. Disponível em: <https://www.stet.com>. Acesso em: 21 abr. 2025.

TOMRA SORTING. *Sensor-based ore sorting systems*. 2025. Disponível em: <https://www.tomra.com>. Acesso em: abr. 2025.

VALE S.A. *Projeto Ferro Carajás S11D: relatório técnico*. 2023. Disponível em: <https://www.vale.com>. Acesso em: 21 abr. 2025.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 7. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006.