



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

JOÃO HENRIQUE SOARES GIMENES

**CARACTERIZAÇÃO E ESTUDOS PRELIMINARES DE MINÉRIO DE
FERRO NA REGIÃO DA SERRA DA BOCAINA, BRUMADINHO - MG.**

ARAXÁ

2025

JOÃO HENRIQUE SOARES GIMENES

**CARACTERIZAÇÃO E ESTUDOS PRELIMINARES DE MINÉRIO
DE FERRO NA REGIÃO DA SERRA DA BOCAINA,
BRUMADINHO - MG.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas
Gerais - Unidade Araxá, como
requisito parcial para obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia
de Minas.

Fábio de São José

Orientador Prof. Dr. Fábio de São José
CEFET-MG/Araxá

Francisco de Castro Valente Neto

Membro Titular Prof. Me. Francisco de Castro Valente Neto
CEFET-MG/Araxá

Marly Aparecida da Silva

Membro Titular Prof^a Dr^a. Marly Aparecida da Silva
CEFET-MG/Araxá

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, fonte de força e sabedoria, por guiar cada etapa da minha jornada acadêmica, concedendo-me coragem para enfrentar desafios e persistência para concluir este trabalho.

À minha família, pelo amor incondicional, pelo apoio incansável e pelas palavras de incentivo, que foram essenciais nos momentos de dificuldade e distância.

À minha companheira, pelo carinho, paciência e compreensão ao longo de toda minha trajetória acadêmica. Seu incentivo e suporte constantes foram fundamentais para que eu superasse os desafios e chegasse até aqui.

Aos meus amigos, que tornaram essa caminhada mais leve e enriquecedora, seja compartilhando conhecimentos, oferecendo apoio ou simplesmente estando presentes nos momentos mais importantes.

Ao CEFET/MG, por proporcionar um ambiente de aprendizado e crescimento, oferecendo as ferramentas e oportunidades necessárias para minha formação.

Aos professores, pelo compromisso em transmitir conhecimento e contribuir significativamente para meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Ao meu orientador, Fábio de São José, pela paciência, dedicação e valiosas orientações ao longo deste trabalho, sempre disposto a oferecer conselhos e direcionamento para alcançar os melhores resultados.

Aos técnicos e estagiários que auxiliaram na realização da parte prática deste estudo, minha sincera gratidão pelo apoio, disponibilidade e colaboração, tornando possível a concretização deste projeto.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu profundo agradecimento!

RESUMO

A indústria mineradora enfrenta um desafio significativo ao extrair minerais de rochas com teores cada vez mais baixos do mineral de interesse, esse problema é agravado pela dificuldade crescente de abrir novos empreendimentos mineiros, devido a questões sociais e ambientais. Com a escassez iminente de minério de ferro de alto teor, as empresas de mineração precisam desenvolver técnicas para explorar reservas com teores médios cada vez mais baixos, posto isso, faz-se necessário ajustar os métodos de beneficiamento mineral, adequando-se a essa nova realidade. No caso específico da Mina da Bocaina, situada entre Brumadinho e Mário Campos, em Minas Gerais, a extração de minério de ferro de teor reduzido requer a implementação de procedimentos inovadores de tratamento. O principal objetivo deste trabalho foi realizar a caracterização preliminar da amostra de itabirito “goethítico” de baixo teor de ferro da Mina da Bocaina. Ao desenvolver pesquisas para o beneficiamento de minérios de baixo teor, ajudará a promover a sustentabilidade econômica e a minimizar os impactos ambientais e sociais da exploração mineral. Como resultados iniciais, levantou-se a umidade do material no estado de entrega, obtendo-se 16,56%, massa específica média de 4,025 g/cm³, P₈₀ de 4 mm e certa “suavidade” da curva granulométrica, indicando que o material não tem uma predominância acentuada de partículas extremamente finas ou extremamente grossas. Essa heterogeneidade sugere que o itabirito “goethítico” analisado não é predominantemente fino. A análise de fluorescência de raios X revelou um teor de ferro total (FeT) de 46,15% na amostra global, sendo maior na fração intermediária (-4# +100#) com 48,51% e menor na fração mais fina (-100# +400#) com 45,12%. A sílica (SiO₂) apresenta comportamento inverso, atingindo 30,53% na fração mais fina e 21,82% na intermediária. A alumina (Al₂O₃) e a perda por calcinação (PPC) apresentaram variações pouco expressivas, já o fósforo (P) foi detectado em 0,60% na amostra global e o manganês (Mn) alcançou 0,82% na fração intermediária. Esses resultados indicam a necessidade de um beneficiamento eficiente para adequação às especificações comerciais. Os achados desta pesquisa fornecem subsídios para o desenvolvimento de estratégias que possibilitem a adequação do minério aos padrões exigidos pelo mercado, garantindo maior eficiência no aproveitamento das reservas de baixo teor e promovendo a sustentabilidade do setor mineral.

Palavras-chave: caracterização, minério de ferro, baixo teor, rotas de beneficiamento.

ABSTRACT

The mining industry faces a significant challenge in extracting minerals from rocks with increasingly lower levels of the mineral of interest, this problem is aggravated by the increasing difficulty of opening new mining ventures, due to social and environmental issues. With the imminent shortage of high-grade iron ore, mining companies need to develop techniques to exploit reserves with increasingly lower average grades. Therefore, it is necessary to adjust mineral processing methods to adapt to this new reality. In the specific case of the Bocaina Mine, located between Brumadinho and Mário Campos, in Minas Gerais, the extraction of low-grade iron ore requires the implementation of innovative treatment procedures. The main objective of this work was to perform the preliminary characterization of the low-grade “goethitic” itabirite sample from the Bocaina Mine. By developing research for the beneficiation of low-grade ores, it will help to promote economic sustainability and minimize the environmental and social impacts of mineral exploration. As initial results, the moisture content of the material in the delivered state was measured, obtaining 16.56%, average specific mass of 4.025 g/cm³, P₈₀ of 4 mm and a certain “smoothness” of the granulometric curve, indicating that the material does not have a marked predominance of extremely fine or extremely coarse particles. This heterogeneity suggests that the “goethitic” itabirite analyzed is not predominantly fine. X-ray fluorescence (XRF) analysis revealed a total iron content (FeT) of 46.15%, with higher concentration in the intermediate fraction (-4# +100#) at 48.51% and lower in the finer fraction (-100# +400#) at 45.12%. Silica (SiO₂) follows an inverse trend, reaching 30.53% in the fine fraction and 21.82% in the intermediate fraction. Alumina (Al₂O₃) and loss on ignition showed minor variations, while phosphorus (P) was detected at 0.60% in the global sample, and manganese (Mn) reached 0.82% in the intermediate fraction. These results indicate the need for an efficient beneficiation process to meet commercial specifications. The findings of this research provide essential insights for developing strategies that allow the adjustment of the ore to market requirements, ensuring greater efficiency in utilizing low-grade reserves and promoting the sustainability of the mining sector.

Keywords: characterization, iron ore, low grade, beneficiation routes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Porção do material úmido.	11
Figura 2 - Material junto a caneta para efeito de comparação da granulometria.....	11
Figura 3 - Material maior que 2 polegadas (bandeja com destaque em vermelho), material menor que 2 polegadas (bandejas com destaque em verde).....	12
Figura 4 - Fragmentação manual com marreta.	12
Figura 5 - Material maior que 0,5 polegadas (6,250 kg).	13
Figura 6 - Britador de mandíbulas (Laboratório de Tratamento de Minérios - CEFET/MG Araxá).	14
Figura 7 - Material britado ainda maior que 0,5 polegada.	14
Figura 8 - Fragmentação com bastão do material ainda maior que 0,5 polegada após a britagem.	15
Figura 9 - Material britado final (6,145 kg).	15
Figura 10 - Pilha alongada (1,75 metros).	16
Figura 11 - Pilha alongada (vista mais próxima).	17
Figura 12 - Pesagem do material em balança de precisão.	17
Figura 13 - Peneirador suspenso (Laboratório de Tratamento de Minérios - CEFET/MG Araxá).	18
Figura 14 - Série de peneiras utilizadas no peneirador suspenso.	18
Figura 15 - Pulverizador (Laboratório de Tratamento de Minérios - CEFET/MG Araxá).....	19
Figura 16 - Moinho de panela.....	20
Figura 17 - Densidade real 4,015 g/cm ³ (teste 01).	22
Figura 18 - Densidade real 4,028 g/cm ³ (teste 02).	22
Figura 19 - Densidade real 4,033 g/cm ³ (teste 03).	23
Figura 20 - Curva granulométrica.	25
Figura 21 - Material retido na peneira de 3/8 polegadas (maior granulometria).	26
Figura 22 - Material afundado (menor que 400 mesh).	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Densidade real da amostra.	23
Tabela 2 - Análise granulométrica.....	24
Tabela 3 - Perda durante o peneiramento a úmido.	25
Tabela 4 - Fluorescência de Raios X (Mineral do Brasil)	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEFET/MG: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

DRX: Difração de raios X

FRX: Fluorescência de raios X

PPC: Perda por calcinação

ROM: Run of mine (minério bruto extraído diretamente da mina)

XRF: X-ray Fluorescence (Fluorescência de Raios X)

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES DE MEDIDA

Fe: Ferro

He: Hélio

Fe₂O₃: Óxido de ferro III

P₂O₅: Pentóxido de fósforo

SiO₂: Dióxido de silício

Al₂O₃: Óxido de alumínio

MnO₂: Dióxido de manganês

P: Fósforo

Mn: Manganês

m: Metro

mm: Milímetro

mesh: Malha de peneiramento

kg: Quilograma

g: Grama

°C: Graus Celsius

#: Número de malha (mesh size)

P₈₀: Tamanho pelo qual 80% do material é passante

%: Porcentagem

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo geral	4
2.2 Objetivos específicos	4
3. REFERENCIAL TEÓRICO	5
3.1 Itabirito Goethítico	5
3.2 Exploração de reservas de ferro de baixo teor	5
3.3 Caracterização mineralógica	6
3.3.1 Análise Granulométrica	6
3.3.2 Picnometria	7
3.3.3 Fluorescência de Raios X (FRX)	8
3.3.4 Difratomia de Raios X (DRX)	8
3.4 Rotas de beneficiamento	9
4. METODOLOGIA	10
4.1 Secagem do material	10
4.2 Britagem	11
4.2.1 Escalpe inicial	12
4.2.2 Fragmentação manual com marreta	12
4.2.3 Peneiramento e preparo para britagem	13
4.2.4 Britagem no britador de mandíbulas	13
4.2.5 Fragmentação adicional com bastão	14
4.2.6 Perdas na britagem	15
4.3 Homogeneização e separação de alíquotas	16
4.4 Picnometria a gás	17
4.5 Peneiramento a úmido	18
4.6 Pulverização das alíquotas para análises FRX e DRX	19
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
5.1 Umidade	21
5.2 Massa específica	22
5.3 Granulometria	24
5.4 Fluorescência de Raios X	26
6. CONCLUSÕES	29
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por novos produtos e tecnologias, aliada ao aumento populacional, tem levado a uma intensificação na produção mineral. Com o avanço da sociedade e a necessidade contínua de recursos minerais para sustentar a infraestrutura, a produção de minerais tornou-se um pilar fundamental para o desenvolvimento econômico e tecnológico. Metais primários e compostos não metálicos, obtidos a partir de minerais, são componentes cruciais em uma variedade de produtos, desde eletrônicos até materiais de construção, e seus papéis são insubstituíveis na modernização das sociedades. No entanto, as reservas minerais estão se esgotando e os teores dos depósitos diminuindo, o que representa um desafio significativo para a indústria mineradora global.

Minerais amplamente utilizados, como o de ferro, são particularmente afetados por esse problema. O ferro, essencial para a produção de aço e diversas outras aplicações industriais, enfrenta uma redução contínua em seus teores nos depósitos explorados, exigindo técnicas de mineração e beneficiamento cada vez mais sofisticadas para manter a produção em níveis economicamente viáveis. Além disso, os minerais de alto teor estão se tornando escassos, forçando as mineradoras a explorar depósitos de baixo teor, que demandam processos mais complexos. A busca por eficiência na extração e processamento é constante, com investimentos em tecnologia e inovação para otimizar a recuperação de minerais e reduzir os custos operacionais.

Ao mesmo tempo, a preocupação ambiental que se intensifica a cada dia, e os fatores sociais, tornam mais difícil a criação de novos empreendimentos mineradores. O aumento da conscientização sobre os impactos ambientais e sociais da mineração tem levado a regulamentações mais rigorosas e à adoção de práticas mais sustentáveis. As mineradoras são desafiadas a equilibrar a produção com a responsabilidade ambiental, buscando minimizar os danos ecológicos, conservar a biodiversidade e garantir a segurança das comunidades locais.

É inegável que a mineração causa impactos significativos, especialmente após os incidentes ocorridos nos últimos anos, como os desastres de Mariana e Brumadinho em Minas Gerais, que destacaram a vulnerabilidade e os riscos associados à atividade mineradora. Esses eventos trouxeram à tona a necessidade urgente de revisões nos padrões de segurança e a implementação de tecnologias

mais seguras e eficientes para prevenir futuros desastres. Além disso, a criação de novas indústrias minerais tem sido dificultada devido a pontos sociais, como a resistência das comunidades locais, a necessidade de realocação de populações, e as preocupações com a preservação do meio ambiente e dos modos de vida tradicionais. Esses fatores sociais exigem das empresas mineradoras um diálogo constante com as comunidades, o desenvolvimento de projetos de responsabilidade social e ambiental, e o cumprimento rigoroso das regulamentações, tornando o processo de estabelecimento de novas operações mineradoras mais complexo e demorado.

Para contornar a questão dos baixos teores, as empresas mineradoras têm buscado soluções inovadoras, explorando métodos capazes de tratar minérios que antes seriam descartados. Essas técnicas permitem extrair lucro de materiais de baixo teor e prolongar a vida útil das minas. O desenvolvimento de tecnologias de beneficiamento, como a flotação e separação magnética, tem sido fundamental para tornar viável a exploração de minérios anteriormente considerados inviáveis.

Um exemplo dessa realidade é a mina da Serra da Bocaina, localizada entre Brumadinho e Mário Campos, em Minas Gerais. A intensa exploração do depósito resultou na redução do teor de ferro presente, sendo uma opção interessante adotar novos métodos para extrair o ferro de baixo teor contido nos itabiritos “goethíticos”. A adaptação a essas novas condições exige pesquisa e desenvolvimento, além da implementação de tecnologias para maximizar a recuperação do ferro.

A caracterização mineral é uma técnica fundamental para o estudo dos minérios, fornecendo informações detalhadas sobre suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas. Esse conhecimento é essencial para o desenvolvimento de métodos de tratamento mais eficientes, permitindo a extração dos minerais de interesse com maior eficácia. A caracterização precisa dos minérios ajuda a determinar a composição exata dos depósitos, identificando os minerais valiosos e os contaminantes, o que é crucial para o planejamento do processo de beneficiamento.

As rotas de beneficiamento variam conforme as características do minério, utilizando métodos diferenciadores como densidade, magnetismo e solubilidade. Cada tipo de minério apresenta desafios únicos que exigem abordagens específicas para a sua separação e purificação. Por exemplo, a separação magnética é eficaz para minérios com propriedades magnéticas, enquanto a flotação é utilizada para

separar partículas com base em suas propriedades de superfície. A escolha da rota de beneficiamento depende de uma série de fatores, incluindo a composição do minério, o tamanho das partículas e as propriedades físico-químicas dos minerais.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O projeto teve como principal meta a caracterização preliminar do itabirito “goethítico”, de baixo teor de ferro, da Mina da Bocaina.

Por meio da análise de amostras representativas do itabirito “goethítico” da Mina da Bocaina, buscou-se identificar e compreender as características desse minério em específico.

Além disso, o trabalho tem como propósito revisar a literatura sobre as questões viáveis e economicamente sustentáveis para o tratamento de minérios de baixo teor.

2.2 Objetivos específicos

- Conduzir trabalhos laboratoriais a fim de preparar alíquotas amostrais para se determinar as propriedades físicas, químicas e mineralógicas das amostras de itabiritos “goethíticos” de baixo teor de Fe da Mina da Bocaina;
- Comparar os resultados obtidos com as especificações de qualidade exigidas pelo mercado, identificando os parâmetros críticos que influenciam na qualidade do minério concentrado e na eficiência do processo de beneficiamento;
- Dar suporte a um projeto de mestrado no PPGEMIN em andamento, buscando sinergias e complementaridades que possam enriquecer a compreensão e as soluções propostas para o beneficiamento de minério de ferro da Mina da Bocaina.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Itabirito Goethítico

Segundo Dias (2022), o itabirito “goethítico” é uma variedade de itabirito caracterizada por sua elevada concentração de goethita, um hidróxido de ferro que confere à rocha colorações que variam do avermelhado ao amarelado. Este tipo de itabirito apresenta um teor de ferro (Fe) bastante variável, geralmente inferior a 60%. Texturalmente, o itabirito “goethítico” pode ser encontrado em estados que vão desde friável até semi-compacto, contendo aproximadamente 20% de material com granulometria acima de 10 mm.

A gênese do itabirito “goethítico” está possivelmente associada à fase deposicional da bacia sedimentar, podendo representar antigos itabiritos carbonáticos, dolomíticos ou anfibolíticos que foram completamente alterados por processos intempéricos (Dias, 2022). Geologicamente, o itabirito “goethítico” ocorre como corpos tabulares concordantes com a estruturação regional, apresentando espessuras que podem alcançar dezenas de metros.

3.2 Exploração de reservas de ferro de baixo teor

De acordo com Carvalho (2012), o minério de ferro tem historicamente apresentado uma evolução lenta nos processos de beneficiamento quando comparado a outras commodities minerais. Essa situação se intensificou com a redução dos teores dos minérios itabiríticos disseminados, resultando em uma demanda crescente por métodos de beneficiamento mais eficazes para minérios de baixo teor.

Diante da iminente escassez de minério de ferro de alto teor, torna-se essencial que as empresas de mineração invistam em estudos e técnicas inovadoras para explorar e aproveitar reservas com teores de ferro mais baixos. Adaptar os processos de beneficiamento mineral a essa nova realidade é crucial não apenas para prolongar a vida útil das minas, mas também para aumentar a produção anual (CARVALHO, 2012).

Essa necessidade de adaptação tornou-se ainda mais evidente com a intensa exploração que levou ao esgotamento das reservas de minério de ferro de alto teor em Minas Gerais. Como resultado, a extração de itabiritos de baixo teor tornou-se uma

prática comum (OMACHI, 2015). Em resposta a esse desafio, foram desenvolvidos diversos projetos com o objetivo de otimizar o aproveitamento desses itabiritos e adaptar as usinas existentes para o tratamento eficiente dos minérios de baixo teor do Quadrilátero Ferrífero (CARLOS *et al.*, 2013).

3.3 Caracterização mineralógica

A caracterização dos minérios é um processo essencial que envolve a análise detalhada das propriedades físicas e químicas dos minerais. Segundo Andrade (2018), essa caracterização é fundamental na mineração, pois possibilita a otimização do uso dos recursos naturais ao oferecer um entendimento aprofundado dos minerais presentes. A análise das características principais dos minerais em amostras representativas é realizada por meio da avaliação de fragmentos de rochas e/ou amostras de produtos granulares representativos. Esse procedimento fornece ao engenheiro de processo informações cruciais para o desenvolvimento e a otimização das técnicas de beneficiamento mineral com fins metalúrgicos (PORPHÍRIO *et al.*, 2010).

Além disso, Porphírio *et al.* (2010) destacam que os minérios apresentam características e peculiaridades distintas, o que implica que processos tecnológicos projetados para um tipo de minério podem não ser igualmente eficazes para outros minérios semelhantes. Essa variabilidade se deve a fatores como a composição mineralógica, que pode variar devido à distribuição aleatória dos minerais no depósito, a granulometria do mineral de interesse e a relação com os minerais de ganga, entre outras variáveis.

3.3.1 Análise Granulométrica

A granulometria desempenha um papel central nos processos de beneficiamento mineral e no tratamento de materiais particulados, sendo essencial para a eficiência técnica e operacional dessas atividades. De acordo com Nogueira *et al.* (2015), a granulometria de separação baseia-se na classificação das partículas pela distribuição de tamanhos, sendo fundamental para avaliar o desempenho dos equipamentos de separação, tanto na entrada quanto na saída do material processado.

Nesse cenário, a caracterização granulométrica se apresenta como uma ferramenta indispensável, oferecendo informações detalhadas sobre a distribuição dos tamanhos das partículas e sua compatibilidade com os métodos de separação utilizados. Essa análise permite otimizar as etapas de processamento ao garantir que o material esteja adequadamente preparado para cada fase subsequente.

Entre os métodos disponíveis para análise granulométrica, o peneiramento destaca-se como uma técnica simples e amplamente empregada, conforme descrito por Cerri (2010). Essa abordagem básica, que separa as partículas com base em seu tamanho, é frequentemente utilizada como ponto de partida para entender o comportamento do material ao longo do processamento. Além disso, sua aplicação influencia diretamente operações subsequentes, como moagem, flotação e concentração gravítica, contribuindo para a eficiência e a qualidade do produto final.

3.3.2 Picnometria

A densidade é a razão entre a massa e o volume de uma substância a uma temperatura e pressão específicas. Também chamada de massa específica, ela se diferencia por se referir a uma substância específica, enquanto a densidade absoluta se aplica a um corpo. As densidades são importantes para identificar substâncias puras, caracterizar e estimar a composição de misturas, e prever o comportamento de substâncias em líquidos, como a flutuabilidade, onde substâncias flutuam se sua densidade for menor que a do líquido. Dentre as técnicas experimentais para determinação da densidade, destaca-se a Picnometria, que utiliza um picnômetro para essa medição (FRANCO; MEDEIROS, 2024).

O princípio de funcionamento da picnometria a gás envolve a pesagem da amostra, que é acondicionada em um porta-amostra de alumínio e inserida no equipamento, onde é purgada com gás hélio (He). Inicialmente, aplica-se uma pressão com o gás He, e, após o sistema atingir o equilíbrio, a pressão é automaticamente medida. Em seguida, uma válvula de expansão é aberta e, após o equilíbrio do sistema, a nova pressão é registrada. Com os valores das duas pressões obtidas, é possível determinar, por meio de equações matemáticas, o volume da amostra e, conseqüentemente, sua densidade. Todo o processo de medição e cálculo é realizado de forma automatizada pelo equipamento. A densidade real, que reflete o volume real ocupado pelo sólido, é determinada ao se excluir os poros da amostra. (FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA - UNICAMP, 2024).

3.3.3 Fluorescência de Raios X (FRX)

A Fluorescência de Raios X (FRX) é uma técnica analítica baseada na emissão de radiação eletromagnética característica de elementos químicos presentes em uma amostra submetida à excitação por um feixe de raios X. A análise multielementar e instrumental por FRX baseia-se na medida das intensidades dos raios X característicos emitidos pelos elementos químicos componentes da amostra, quando devidamente excitados (JÚNIOR, 2007).

Segundo Urbano (2013), essa técnica é amplamente utilizada para a análise quantitativa e qualitativa dos principais óxidos, como Fe_2O_3 , P_2O_5 , SiO_2 , Al_2O_3 , MnO_2 , entre outros.

A eficácia do método depende de fatores como a geometria do sistema de detecção, a preparação das amostras e o uso de correções analíticas, como o método ZAF (número atômico, absorção e fluorescência secundária), que minimizam interferências nos resultados e garantem maior acurácia. No contexto da mineração, a FRX é essencial para o monitoramento da composição química do minério, contribuindo para o atendimento às especificações de mercado e para uma melhor gestão da lavra (URBANO, 2013).

3.3.4 Difractometria de Raios X (DRX)

A Difractometria de Raios X (DRX) é uma técnica amplamente utilizada para a caracterização de materiais e essencial para a identificação de minerais em estudos geológicos. Conforme Bish e Reynolds (1989), a difração de raios X é uma das técnicas mais importantes para a caracterização microestrutural de materiais cristalinos, sendo muito empregada em diversas aplicações.

A técnica baseia-se na difração dos raios X pelos átomos dispostos em planos, permitindo investigar pequenas estruturas da matéria e determinar a composição mineralógica de amostras geológicas. Segundo Bish e Reynolds (1989), a difração de raios X ocorre quando os raios X atingem um material e são espalhados elasticamente, sem perda de energia pelos elétrons de um átomo. O fóton de raios X, após a colisão com o elétron, muda sua trajetória, mantendo a mesma fase e energia do fóton incidente.

De acordo com Silva (2013), a DRX é particularmente eficaz para identificar minerais principais em rochas, mas apresenta limitações na identificação de minerais acessórios devido ao excesso de picos nos difratogramas. A técnica é indicada para a análise de amostras bem cristalinas, como minerais isolados, e menos eficiente para rochas com múltiplas fases minerais.

Para melhorar a qualidade das análises, podem ser utilizados métodos auxiliares de fracionamento, como a separação magnética, que permite reduzir o número de fases presentes e facilita a identificação de minerais acessórios (SILVA, 2013).

3.4 Rotas de beneficiamento

Todo o planejamento da mina é fundamentado em premissas que sustentam o projeto e definem a vida útil esperada. É amplamente reconhecido que a duração de uma mina pode ser estendida devido a investimentos em pesquisa mineral, desenvolvimento de novas rotas de processamento mineral, mudanças no mercado, condições ambientais e outros fatores (OMACHI, 2015).

A definição das rotas de processamento de minérios de ferro é guiada por critérios que incluem fatores intrínsecos e extrínsecos. Fatores intrínsecos referem-se às características do minério bruto (ROM), como distribuição granulométrica, granulometria de liberação, teores químicos e associações mineralógicas. Já os fatores extrínsecos envolvem as propriedades necessárias para o transporte e processamento subsequente, tais como aglomeração e redução metalúrgica. Além disso, aspectos econômicos da adequação do minério também são considerados na definição das rotas de processamento (ANDRADE, 2018).

Para minérios com baixo teor de ferro, a concentração é geralmente realizada por métodos gravíticos, separação magnética e flotação. O método gravítico é aplicado quando a liberação dos minerais de interesse da ganga ocorre em faixas granulométricas mais grossas. Em contraste, para minérios que necessitam de moagem fina para a liberação dos minerais de interesse, como os itabiritos, a concentração é predominantemente feita por separação magnética de alta intensidade a úmido e flotação catiônica reversa, muitas vezes combinando ambos os métodos (REIS, 2015).

4. METODOLOGIA

A metodologia para abordar o tema "Caracterização e estudos preliminares de minério de ferro na região da Serra da Bocaina, Brumadinho - MG" é estruturada nas etapas: abordagem de pesquisa, tratamento das amostras, coleta de dados e análise de dados.

A abordagem de pesquisa adotada é do tipo exploratória-descritiva. Esse método permitirá uma caracterização detalhada dos itabiritos e uma compreensão abrangente de suas propriedades. A fase exploratória visa identificar as potencialidades e limitações dos itabiritos "goethíticos", enquanto a fase descritiva fornecerá uma visão detalhada sobre as características encontradas.

Amostra representativa dos depósitos itabiríticos, foi coletada e encaminhada pela Mineral do Brasil, Brumadinho-MG. No Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET/MG, campus Araxá, essa amostra foi submetida a secagem e a criterioso procedimento de homogeneização.

Seguidamente, a amostra foi quarteada para gerar alíquotas aos seguintes ensaios:

- Análise granulométrica para se determinar a curva de distribuição de tamanhos de partículas. *Local: Laboratório de Tratamento de Minérios, CEFET/MG-Araxá;*
- Picnometria a gás, com intuito de se determinar a massa específica da amostra global. *Local: Laboratório de Tratamento de Minérios, CEFET/MG-Araxá;*
- Análise química dos óxidos principais por Fluorescência de Raios X, de acordo com especificação para produtos de minério de ferro. *Local: Mineral do Brasil;*
- Caracterização mineralógica por Difractometria de Raios X. *Local: Laboratório de Engenharia de Materiais, CEFET/MG-Belo Horizonte.*

4.1 Secagem do material

Inicialmente, o material foi pesado em sua condição úmida. Para isso, foram utilizadas bandejas (Figura 1) para acomodar o material em uma balança, registrando-se um peso de 30,125 kg. Em seguida, as bandejas contendo o material foram levadas a estufa, com o objetivo de realizar a secagem completa e remover toda a umidade presente. Após o processo de secagem (máximo 100°C e por mais de 24 horas), o

peso do material seco foi determinado como 25,844 kg. A umidade do material foi calculada com a Equação 1:

$$Umidade (\%) = \frac{Peso \acute{u}mido - Peso \textit{seco}}{Peso \textit{seco}} \times 100 \quad (1)$$

Figura 1 - Porção do material úmido.



Fonte: Próprio autor.

4.2 Britagem

Devido à granulometria heterogênea do material (Figura 2), que apresentava partículas de diferentes tamanhos e formatos, tornou-se imprescindível realizar uma etapa de britagem. Esse processo visou reduzir as dimensões das partículas maiores, uniformizar o tamanho do material e facilitar etapas subsequentes de processamento, como a homogeneização e classificação granulométrica.

Figura 2 - Material junto a caneta para efeito de comparação da granulometria.



Fonte: Próprio autor.

4.2.1 Escalpe inicial

O primeiro passo foi um escalpe inicial utilizando uma peneira com abertura de 2 polegadas, para separar as partículas mais grossas da amostra. O material retido na peneira foi considerado grosso e seguiu para a etapa de fragmentação manual por meio do uso de marreta. A Figura 3 destaca o resultado da primeira separação por tamanho.

Figura 3 - Material maior que 2 polegadas (bandeja com destaque em vermelho), material menor que 2 polegadas (bandejas com destaque em verde).



Fonte: Próprio autor.

4.2.2 Fragmentação manual com marreta

O material retido na peneira de 2 polegadas foi fragmentado manualmente com o auxílio de uma marreta. Esse processo foi realizado sobre uma lona, garantindo a contenção do material e evitando sua dispersão. A Figura 4 trata do registro da etapa.

Figura 4 - Fragmentação manual com marreta.



Fonte: Próprio autor.

4.2.3 Peneiramento e preparo para britagem

Após a fragmentação manual, todo o material, incluindo as frações finas já presentes, foi peneirado utilizando uma malha com abertura de 0,5 polegada. A etapa de fragmentação manual prévia foi essencial para garantir que o material apresentasse dimensões adequadas à abertura do britador, prevenindo obstruções e reduzindo o desgaste do equipamento, além de otimizar a eficiência do processo de britagem. A Figura 5 registra a fração de material retido em 0,5 polegada para alimentação no britador de mandíbulas.

Figura 5 - Material maior que 0,5 polegadas (6,250 kg).



Fonte: Próprio autor.

4.2.4 Britagem no britador de mandíbulas

Todo o material retido na peneira de 0,5 polegada foi submetido ao britador de mandíbulas, Figura 6. Após a britagem, o material processado foi novamente peneirado com a peneira de 0,5 polegada para avaliar a eficiência da redução granulométrica. Observou-se que a maior parte do material foi reduzida para granulometrias menores que 0,5 polegada, conforme evidenciado pela pequena quantidade de material ainda retida na peneira, Figura 7.

Figura 6 - Britador de mandíbulas (Laboratório de Tratamento de Minérios - CEFET/MG Araxá).



Fonte: Próprio autor.

Figura 7 - Material britado ainda maior que 0,5 polegada.



Fonte: Próprio autor.

4.2.5 Fragmentação adicional com bastão

Considerando a alta friabilidade da amostra, caracterizada pela sua facilidade de fragmentação, o material retido na peneira de 0,5 polegada foi submetido a uma fragmentação manual utilizando um bastão de madeira. Esse procedimento foi realizado sobre uma lona, mostrada na Figura 8, garantindo a recuperação integral do material e assegurando que todas as partículas fossem devidamente reduzidas a tamanhos compatíveis para as etapas subsequentes.

Figura 8 - Fragmentação com bastão do material ainda maior que 0,5 polegada após a britagem.



Fonte: Próprio autor.

4.2.6 Perdas na britagem

Ao final do processo, todo o material foi reduzido a uma granulometria inferior a 0,5 polegada, Figura 9. Durante o processo, foi registrada uma perda de 105 gramas de material, representado apenas 0,41% de perda mássica.

Figura 9 - Material britado final (6,145 kg).



Fonte: Próprio autor.

4.3 Homogeneização e separação de alíquotas

A etapa seguinte envolveu a homogeneização do material, com o objetivo de garantir sua uniformidade e viabilizar a separação de alíquotas representativas para as análises subsequentes. Para isso, foi formada uma pilha alongada com 1,75 metros de comprimento, de modo a assegurar uma distribuição homogênea do material, com sua altura moderada. As dimensões escolhidas foram consideradas adequadas à quantidade disponível, promovendo a eficiência do processo. As Figuras 10 e 11 tratam dos registros fotográficos das pilhas formadas.

Para aprimorar a homogeneidade, 10% do material de cada lado da pilha foi removido, redistribuindo-se sobre a mesma. Posteriormente, foram retiradas alíquotas do centro da pilha para diferentes tipos de análise, conforme descrito:

- 200 gramas: Peneiramento a úmido para análise granulométrica;
- 100 gramas: Picnometria;
- 100 gramas: Fluorescência de Raios X (FRX);
- 100 gramas: Difractometria de Raios X (DRX).

Figura 10 - Pilha alongada (1,75 metros).



Fonte: Próprio autor.

Figura 11 - Pilha alongada (vista mais próxima).



Fonte: Próprio autor.

4.4 Picnometria a gás

Na etapa de picnometria a gás, o material foi inicialmente pesado em uma balança de precisão (Figura 12), registrando-se um valor de 98,64 gramas, que foi inserido no picnômetro como dado inicial. Para garantir a confiabilidade dos resultados, foram realizados três testes consecutivos, com a temperatura mantida em uma média ideal de 22,95°C. Esses cuidados foram fundamentais para assegurar a precisão e a reprodutibilidade do método, reforçando a confiabilidade do procedimento adotado.

Figura 12 - Pesagem do material em balança de precisão.



Fonte: Próprio autor.

4.5 Peneiramento a úmido

Para o peneiramento a úmido, foi utilizada uma alíquota de 196 gramas. As peneiras foram selecionadas com base em uma avaliação visual da granulometria da amostra. A série utilizada incluiu as seguintes malhas: 3/8 de polegada, 4 mesh, 16 mesh, 70 mesh, 100 mesh, 200 mesh, 325 mesh e 400 mesh.

Devido à capacidade limitada do peneirador suspenso, que suporta no máximo sete peneiras, o peneiramento utilizando a peneira de 3/8" foi realizado manualmente. Essa abordagem foi adotada considerando que, visualmente, poucas partículas ficariam retidas nessa peneira, além da necessidade de assegurar que a primeira peneira não retenha mais de 5% do material total, conforme boas práticas de peneiramento. Essa medida foi essencial para garantir a eficiência do processo subsequente, evitando sobrecarga na peneira, melhorando o fluxo de material e assegurando a representatividade da separação granulométrica.

As demais peneiras foram processadas no peneirador suspenso, Figuras 13 e 14. Após a separação granulométrica, o material foi distribuído em pratos de acordo com a fração retida em cada peneira e, em seguida, colocado para secagem em estufa. Todo o processo foi registrado com detalhes para documentação e controle da metodologia aplicada.

Figura 13 - Peneirador suspenso (Laboratório de Tratamento de Minérios - CEFET/MG Araxá).



Figura 14 - Série de peneiras utilizadas no peneirador suspenso.



Fonte: Próprio autor.

4.6 Pulverização das alíquotas para análises FRX e DRX

A pulverização de materiais é uma etapa essencial na preparação de amostras para análises químicas e mineralógicas, como Fluorescência de Raios X (FRX) e Difração de Raios X (DRX). Esse processo consiste em reduzir o material a partículas extremamente finas através do moinho de panela (Figura 15 e 16), garantindo uma homogeneidade adequada, fundamental para a obtenção de resultados analíticos precisos e reprodutíveis.

Inicialmente, foram pulverizadas amostras globais de 100 g destinadas às análises de FRX e outras 100 g para DRX. Os materiais retidos no peneiramento a úmido também foram pulverizados com o objetivo de realizar uma análise granuloquímica.

Como análises confiáveis demandam quantidades consideráveis de material, os finos resultantes do peneiramento foram combinados em uma única alíquota, enquanto os materiais mais grosseiros formaram outra alíquota separada. Para a análise química por FRX, foram enviados 100 g de uma amostra global, bem como os materiais finos (granulometrias de 200#, 325# e 400#) e grossos (granulometrias de 4#, 16#, 70# e 100#) provenientes do peneiramento a úmido, à empresa Mineral do Brasil, responsável pela análise química do itabirito “goethítico”. Paralelamente, outra amostra global de 100 g foi enviada ao CEFET/MG, em Belo Horizonte, para a realização da análise de DRX. Essa abordagem metodológica assegura que as amostras estejam em condições ideais para análises subsequentes, proporcionando resultados confiáveis tanto na identificação de fases minerais quanto na determinação de concentrações elementares.

Figura 15 - Pulverizador (Laboratório de Tratamento de Minérios - CEFET/MG Araxá).



Fonte: Próprio autor.

Figura 16 - Moinho de panela.



Fonte: *Próprio autor.*

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Umidade

A partir dos dados apresentados na metodologia, a umidade foi calculada da seguinte maneira:

$$Umidade (\%) = \frac{30,125 - 25,844}{25,844} \times 100 = 16,56\%$$

Portanto, a umidade do material foi determinada em 16,56%, refletindo uma quantidade moderada de água presente antes do processo de secagem. Esse resultado pode ser atribuído a fatores como condições de armazenamento, características intrínsecas do minério e variações ambientais. O controle da umidade é um parâmetro fundamental nos processos industriais, particularmente no beneficiamento mineral, devido ao impacto direto sobre etapas operacionais como britagem, moagem, transporte e peneiramento.

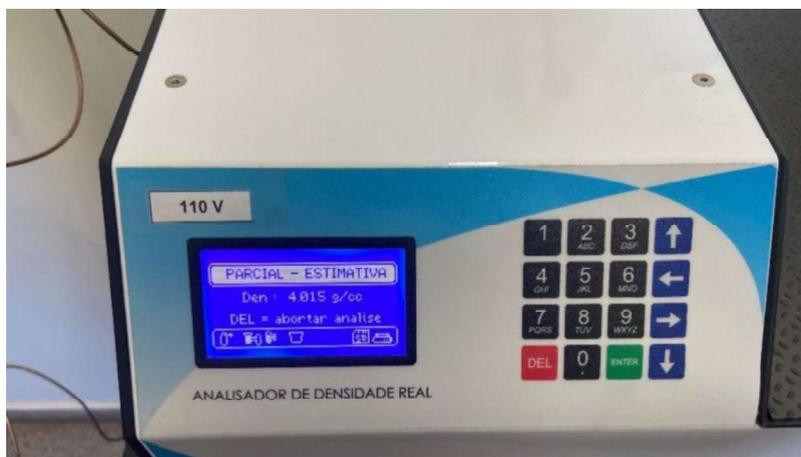
A remoção completa da umidade mostrou-se essencial para garantir a representatividade das amostras, assegurando a precisão das análises químicas e mineralógicas e a confiabilidade dos resultados experimentais.

De acordo com Alvares *et al.* (2023), o teor de umidade do minério de ferro também é um aspecto crítico no planejamento e execução de processos industriais, influenciando significativamente a qualidade do material durante o beneficiamento, transporte e estocagem. Esse contexto reforça a importância do controle rigoroso da umidade, uma vez que teores elevados podem comprometer tanto a eficiência operacional quanto a logística do material. O teor de 16,56% encontrado neste estudo evidencia a necessidade de estratégias adicionais, como empilhamento para secagem natural ou até mesmo secagem aprimorada e adequações nos processos industriais e logísticos, para mitigar potenciais impactos adversos.

5.2 Massa específica

Na etapa de picnometria a gás, foi determinado o valor médio da densidade do material em $4,025 \text{ g/cm}^3$, a partir dos três testes consecutivos realizados sob condições controladas. Os resultados individuais foram $4,015 \text{ g/cm}^3$, $4,028 \text{ g/cm}^3$ e $4,033 \text{ g/cm}^3$, demonstrando uma variação mínima entre as medições. Essa consistência reflete a precisão do método adotado, reforçada também pelo controle da temperatura a uma média de $22,95^\circ\text{C}$ durante os experimentos. Fotografias do picnômetro estão evidenciadas nas Figuras 17 a 19, por questão de registro.

Figura 17 - Densidade real $4,015 \text{ g/cm}^3$ (teste 01).



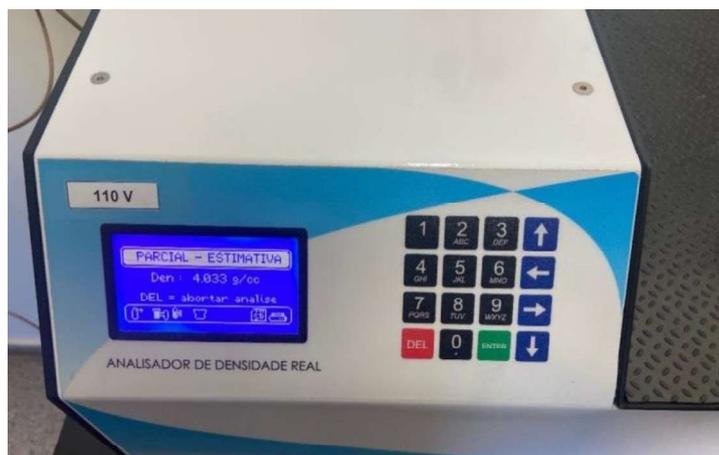
Fonte: Próprio autor.

Figura 18 - Densidade real $4,028 \text{ g/cm}^3$ (teste 02).



Fonte: Próprio autor.

Figura 19 - Densidade real 4,033 g/cm³ (teste 03).



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 1 organiza os dados obtidos na etapa de picnometria.

Tabela 1 - Densidade real da amostra.

Teste	Temperatura (°C)	Massa (g)	ds (g/cm ³)
1	22,86	98,64	4,015
2	22,98	98,64	4,028
3	23	98,64	4,033
Média	22,95	Média	4,025

A densidade média obtida para o itabirito “goethítico” neste estudo (**4,025 g/cm³**) está significativamente acima da faixa relatada na literatura. Braga (2019) caracterizou diferentes itabiritos do Quadrilátero Ferrífero, incluindo o itabirito “goethítico”, e encontrou uma densidade média de **2,075 g/cm³**, consideravelmente inferior ao valor apresentado aqui.

Essa discrepância pode ser atribuída a características específicas do material analisado, como sua composição mineralógica e porosidade. Braga (2019) destacou que a presença predominante de minerais como goethita e hematita, combinada com uma porosidade mais elevada, resulta em densidades relativamente baixas. No entanto, a densidade elevada observada neste estudo sugere um teor significativamente maior de goethita e uma porosidade total ou conectada reduzida, fatores que diminuem o volume de vazios no material e, conseqüentemente, aumentam sua densidade.

Além disso, as análises mineralógicas e químicas realizadas neste trabalho serão essenciais para uma compreensão mais detalhada desses resultados, permitindo identificar com maior precisão a proporção de minerais e elementos presentes no material. Esses dados serão fundamentais para correlacionar a composição química com as propriedades físicas, como a densidade, e para avaliar seu impacto em processos industriais subsequentes, fornecendo informações relevantes para aplicações práticas.

5.3 Granulometria

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos na análise granulométrica realizada após o peneiramento à úmido em peneirador suspenso. Observa-se que a faixa granulométrica com a maior quantidade de material corresponde às partículas menores que 400# (inferiores a 0,037 mm), representando a fração mais fina do material. Essa fração acumulou um total de 36,5 g, correspondendo a 18,9% da amostra analisada.

Outro aspecto relevante é a contribuição da faixa granulométrica correspondente a 16# (abertura de 1,19 mm), que reteve 32,8 g, representando 17% do material total. Esses resultados evidenciam uma maior concentração de partículas nas extremidades da distribuição granulométrica, tanto na fração fina quanto na fração intermediária, indicando características heterogêneas da amostra analisada.

Tabela 2 - Análise granulométrica.

Abertura (mm)	Abertura (mesh)	Massa (g)	Retido simples (%)	Retido acumulado (%)	Passante acumulado (%)
9,52	3/8#	2	1,0	1,0	99,0
4,76	4#	29,9	15,5	16,6	83,4
1,19	16#	32,8	17,0	33,6	66,4
0,21	70#	17,0	8,8	42,5	57,5
0,149	100#	7,5	3,9	46,4	53,6
0,074	200#	29,3	15,2	61,6	38,4
0,044	325#	30,4	15,8	77,3	22,7
0,037	400#	7,2	3,7	81,1	18,9
-0,037	-400#	36,5	18,9	100	0
-	TOTAL	192,6	100	-	-

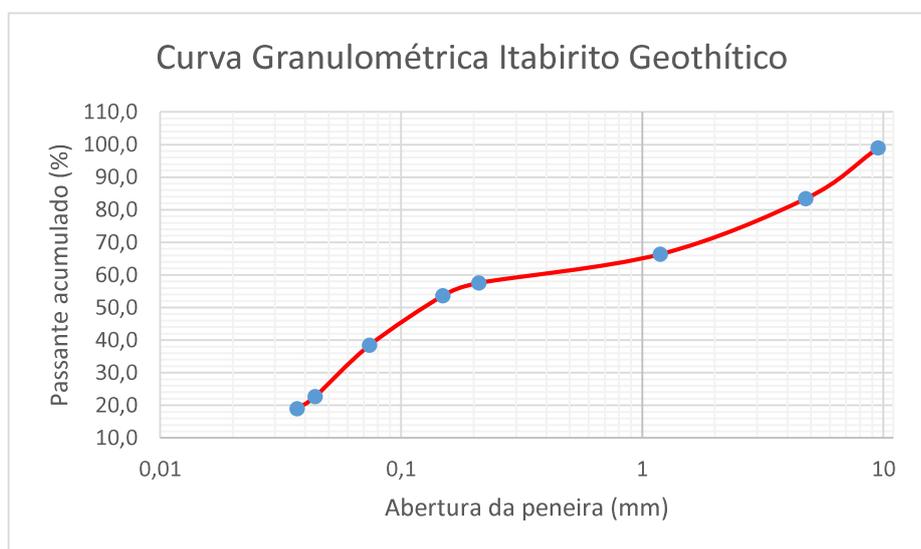
A Tabela 3 indica a quantidade de material perdido durante o peneiramento, totalizando 3,4 g.

Tabela 3 - Perda durante o peneiramento a úmido.

Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda (g)	Perda (%)
196	192,6	3,4	1,73%

A curva granulométrica, apresentada na Figura 20, demonstra a distribuição percentual acumulada das partículas em função do tamanho das peneiras utilizadas. A suavidade da curva indica que o material não tem uma predominância acentuada de partículas extremamente finas ou extremamente grossas. Isso reflete uma distribuição heterogênea de tamanhos de partículas, com contribuições relevantes em diferentes faixas granulométricas. Essa heterogeneidade sugere que o itabirito “goethítico” analisado não é predominantemente fino, apesar de possuir uma fração significativa na peneira -400# (-0,037 mm).

Figura 20 - Curva granulométrica.



Com base na análise da curva granulométrica, foi determinado o P_{80} , ou seja, o diâmetro pelo qual 80% do material passa. Nesse caso, o P_{80} foi estimado em aproximadamente 4 mm, indicando que a maior parte do material possui granulometria inferior a esse valor. Essa informação é essencial para o planejamento das etapas subsequentes do beneficiamento.

Os resultados obtidos nesta análise foram comparados com dados de estudos previamente realizados sobre itabirito “goethítico”. Em particular, um estudo conduzido por Dias (2022), destacou que o itabirito “goethítico” apresenta uma distribuição granulométrica heterogênea, com presença significativa de frações finas e grossas, semelhante aos resultados encontrados neste trabalho. Essa característica pode ser atribuída à composição mineralógica do itabirito “goethítico”, que inclui minerais como goethita e hematita, que influenciam na fragmentação e distribuição das partículas durante os processos de cominuição.

As Figuras 21 e 22 apresentam, respectivamente, o material com a granulometria mais grosseira retida (superior a 3/8" ou 9,52 mm) e o material com a granulometria mais fina (inferior a 400 mesh ou 0,037 mm).

Figura 21 - Material retido na peneira de 3/8 polegadas (maior granulometria).



Figura 22 - Material afundado (menor que 400 mesh).



Fonte: Próprio autor.

5.4 Fluorescência de Raios X

A análise química realizada por Fluorescência de Raios X permitiu a caracterização da composição elementar do minério estudado. A Tabela 4 apresenta os teores dos principais constituintes da amostra global e das frações separadas por peneiramento. Os resultados foram obtidos pela Mineral do Brasil.

Tabela 4 - Fluorescência de Raios X (Mineral do Brasil).

Identificação	FeT	SiO ₂	Al ₂ O ₃	PPC	P	Mn	Fechamento
Amostra Global (%)	46,15	25,94	1,16	3,08	0,060	0,50	96,94
Amostra -100# +400# (%)	45,12	30,53	0,42	1,14	0,053	0,15	96,91
Amostra -4# e +100# (%)	48,51	21,82	1,55	2,96	0,053	0,82	96,86

Os resultados indicam que a amostra global apresenta um teor de ferro total (FeT) de 46,15%. A fração mais fina (-100# +400#) exibe uma leve redução desse valor (45,12%), enquanto a fração intermediária (-4# +100#) registra um aumento significativo, atingindo 48,51%. Esse comportamento sugere uma maior concentração de ferro nas partículas de tamanho intermediário.

A sílica (SiO₂) apresenta uma distribuição inversa à do ferro, com maior teor na fração mais fina (30,53%) e menor na intermediária (21,82%), evidenciando a influência da separação granulométrica na distribuição dos minerais portadores de ferro e sílica.

A alumina (Al₂O₃) apresentou variações menos expressivas, seguindo um padrão semelhante ao observado para outros componentes. O maior teor de Al₂O₃ (1,55%) foi identificado na fração intermediária. Já a perda por calcinação (PPC) na amostra global atingiu 3,08%, representando o maior valor registrado. Na análise de minérios, a PPC é um parâmetro relevante para a quantificação de impurezas e compostos voláteis no material. Valores elevados podem indicar a presença significativa de minerais hidratados ou carbonatos, influenciando diretamente a qualidade do minério em processos metalúrgicos. O valor de 3,08% sugere uma quantidade moderada de compostos voláteis na amostra analisada.

Os teores de fósforo (P) e manganês (Mn), considerados impurezas em processos metalúrgicos, foram detectados em 0,60% de P na amostra global, enquanto o Mn apresentou um leve aumento na fração intermediária, atingindo 0,82%.

De modo geral, a separação granulométrica favorece o enriquecimento do ferro nas partículas intermediárias, enquanto as frações mais finas concentram maiores quantidades de sílica. Esses achados fornecem subsídios importantes para a definição de uma rota preliminar de beneficiamento do minério.

Gonçalves (2019) apresenta os seguintes valores de referência exigidos pelo mercado para minérios de ferro concentrado, ou seja, o produto final após o

beneficiamento: Fe superior a 64,90%, SiO₂ inferior a 3,2%, Al₂O₃ abaixo de 0,90% e P menor que 0,040%. Alcançar esses padrões constitui um desafio significativo, demandando a definição de uma rota de beneficiamento eficiente para otimizar os teores do minério analisado.

O material estudado apresenta um teor de ferro consideravelmente abaixo do mínimo exigido, o que requer etapas de beneficiamento para seu enriquecimento. Além disso, os elevados níveis de sílica representam um dos principais desafios para a adequação ao mercado, tornando essencial a escolha de um processo eficiente para sua remoção.

A alumina e o fósforo também ultrapassam os limites recomendados. Embora a concentração de Al₂O₃ na amostra global (1,16%) não seja excessivamente elevada, ainda excede o valor ideal, tornando necessária sua redução. O fósforo (0,060%) encontra-se acima do limite de 0,040%, podendo comprometer a qualidade final do minério.

Em síntese, o itabirito "goethítico" estudado apresenta teores de Fe abaixo dos padrões comerciais e níveis consideráveis de impurezas, o que reforça a necessidade de selecionar uma rota de beneficiamento eficiente para atingir os melhores resultados possíveis dentro das especificações exigidas pelo mercado.

6. CONCLUSÕES

A realização deste estudo reforçou a importância da caracterização mineral para a definição de tipologias, levantamento de propriedades e direcionamento de estratégias para o beneficiamento mineral. A caracterização adequada permite compreender as particularidades do minério e estabelecer parâmetros iniciais para otimizar seu processamento industrial.

Os procedimentos adotados garantiram uma amostragem representativa e confiável, minimizando perdas e assegurando resultados consistentes. A escolha criteriosa das técnicas de homogeneização e quarteamento possibilitou manipular a amostra com um baixo percentual de perda mássica, estimado em apenas 0,41% do total inicial, o que reforça a eficiência do método empregado.

Os ensaios de caracterização preliminar demonstraram que a amostra classificada como itabirito “goethítico” apresenta características físicas e mineralógicas bem definidas. Foram obtidos valores de umidade de 16,56% no estado de entrega, massa específica média de 4,025 g/cm³ e P80 de 4 mm, indicando um material com distribuição granulométrica heterogênea, sem predominância de partículas extremamente finas ou grossas.

A análise química por Fluorescência de Raios X (FRX) revelou que o teor de ferro total (FeT) da amostra global é de 46,15%, enquanto a fração intermediária (-4# +100#) apresentou um enriquecimento, atingindo 48,51%. Por outro lado, a fração mais fina (-100# +400#) registrou uma leve redução desse valor (45,12%). Esse comportamento sugere que as partículas de tamanho intermediário concentram maior quantidade de ferro, enquanto as frações mais finas possuem maiores teores de sílica (SiO₂), atingindo 30,53% nessa granulometria, contra 21,82% na fração intermediária.

Ao comparar os valores obtidos com as especificações comerciais para minérios de ferro, que se referem ao material já beneficiado (ferro concentrado), verifica-se que o teor de Fe do material analisado está significativamente abaixo do mínimo exigido pelo mercado (64,90%). Além disso, os altos teores de sílica comprometem sua qualidade para uso direto na indústria siderúrgica, reforçando a necessidade de um beneficiamento eficiente para viabilizar sua aplicação comercial.

Dessa forma, os resultados obtidos fornecem subsídios iniciais para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes no beneficiamento do minério de ferro da Mina da Bocaina. Estratégias como separação gravítica, concentração magnética

e flotação devem ser avaliadas para reduzir as impurezas e aumentar o teor de Fe no concentrado final.

A continuidade das análises laboratoriais, aliada a estudos complementares, permitirá avaliar alternativas viáveis para o tratamento desse material, contribuindo para a otimização dos processos e para um aproveitamento mais eficiente das reservas minerais disponíveis.

Além dos conhecimentos técnicos adquiridos, a execução deste trabalho foi fundamental para o crescimento profissional, proporcionando um aprendizado prático essencial. A aplicação dos conceitos estudados ao longo do curso permitiu aprimorar habilidades de análise, tomada de decisão e resolução de problemas, competências indispensáveis para a atuação na mineração.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, M. R. N.; MONTE, M. B. M.; SIMÃO, R. A. **Estudo da redução da umidade do minério de ferro pela aplicação do tratamento por plasma de hexametildissiloxano.** Rio de Janeiro: CETEM/UFRJ, 2023.

ANDRADE, Wellington Fernando de. **Beneficiamento de minério de ferro: a importância da caracterização tecnológica na definição de rota de processo.** 2018. 45 p. Monografia (Graduação, Engenharia de Minas) - Fundação Presidente Antônio Carlos de Conselheiro Lafaiete, Concelheiro Lafaiete, 2018.

ASTOS, Ana Carolina Lisboa; SILVA, André Luiz Alves da; SANTOS, Marcos Júnio Alves dos; OLIVEIRA, Maria Cecília Nogueira Teles; FERNANDES, Raíssa Lóren de Oliveira; COSTA, Sergio Eduardo Rodrigues; MATA, Jônatas Franco Campos da. **DESAFIOS TECNOLÓGICOS DO APROVEITAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO DE GRÃO MOGOL/MG: Capítulo 3.** Engenharias: Desenvolvimento de processos e produtos 2, [s. l.], 2 maio 2023.

BISH, D. L.; REYNOLDS, R. C. **Sample preparation for X-ray diffraction.** In: Modern Powder Diffraction. Mineralogical Society of America, Washington, D.C., 1989, Cap.4, p. 73-97.

BRAGA, Deivid de Moura. **Técnicas de análises de densidade e porosidade de minério de ferro por cálculo normativo mineralógico, microtomografia computadorizada, permoporosimetria e picnometria clássica: um estudo comparativo entre os métodos.** 2019. 254 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2019.

CARLOS, J. G., NEYMAYER, P. L., NILTON, T., SELMIR, S., JOSEMAR, C. (2013). **ROTA DE PROCESSO OTIMIZADA PARA CONCENTRAÇÃO DE ITABIRITOS POBRES DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINÉRIOS & MINERALES.**

CARVALHO, Pedro Sergio Landim de; SILVA, Marcelo Machado da; ROCIO, Marco Aurélio Ramalho; MOSZKOWICZ, Jacques. **Minério de ferro**. BNDES Setorial 39, [S. l.], p. 197-234, mar. 2014.

Cerri, F. F. P. **Estudo para validação de modelo gás-sólido em separação ciclônica de sais de iodo na indústria química**. [Dissertação de Mestrado]. Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis; 2010

DIAS, A. G. **Melhoria da Previsibilidade da Programação de Produção baseado na Umidade do ROM e Taxa de Alimentação das Usinas de Mariana**. Instituto Tecnológico Vale (ITV), 2022.

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA - UNICAMP. Técnica – PIC (Orientativo): **Picnometria a Gás He**. Laboratório de Caracterização de Biomassa, Recursos Analíticos e de Calibração – LRAC. Instrução de serviço IS-051, Rev. 01. Emissão: 02 jan. 2024. 2 p.

FRANCO, Francisca Iara A.; MEDEIROS, Raquel S. **Determinação de densidade por Picnometria**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química. *Revista Descomplicando a Termodinâmica*. Natal, 2024.

GONÇALVES, Gizele Maria Campos. **Caracterização tecnológica do itabirito anfíbolítico da Mina de Brucutu-MG**. 2019. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/handle/capes/650750>. Acesso em: 12 fev. 2025.

JÚNIOR, A. da S. M. **ANÁLISE QUANTITATIVA DO MATERIAL PARTICULADO NA REGIÃO DE CAMPINAS ATRAVÉS DAS TÉCNICAS DE MICROFLUORESCÊNCIA DE RAIOS X E REFLEXÃO TOTAL USANDO RADIAÇÃO SÍNCROTRON**. Orientador: SILVANA MOREIRA. 2007. 286 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 2007.

NOGUEIRA, B.A.; PINHEIRO, M. L. B.; MARQUES, L. M.; COSTA, D. S. **Estudo da análise granulométrica por peneiramento de minérios da região de Carajás – Pa.** In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 26., 2015, Poços de Caldas. Anais... Associação Brasileira de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2015. 632 p.

OMACHI, G.Y. **Estudos para o aumento da vida útil das minas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero.** 2015. 83 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

PORPHÍRIO, Ney Hamilton; BARBOSA, Marília Inês M.; BERTOLINO, Luiz Carlos. **Caracterização Mineralógica de Minérios: Parte I.** Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia - Coordenação de Processos Mineraiis – COPM: Comunicação Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios, 5ª Edição, [s. l.], p. 57–84, ago. 2010.

REIS, José Marcelino. **Avaliação da Flotação de Minério de Ferro de Brucutu Considerando a Divisão em Dois Circuitos: Grossos e Finos.** Orientador: Prof. Antônio Eduardo Clark Peres. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte, 2015.

SILVA, Amanda Luzia da. **Caracterização mineralógica por difração de raios X e determinação de terras raras por ICP-MS de rochas da região sul da Bahia.** 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SOUZA, N. (2010). **Análise crítica de rotas de processamento de minério de ferro itabiríticos.** Projeto de Graduação - UFRJ / Escola Politécnica / Curso de Engenharia Metalúrgica, Rio de Janeiro.

URBANO, Emílio Evo Magro Corrêa. **Estudo de caso sobre aplicação de um analisador químico de mão no controle de qualidade de minério de ferro.** 2013. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.