



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

GUILHERME PEREIRA BARBOSA DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E DA MINERALOGIA NA QUALIDADE DOS
BRIQUETES**

FORTALEZA

2026

GUILHERME PEREIRA BARBOSA DOS SANTOS

INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E DA MINERALOGIA NA QUALIDADE DOS
BRIQUETES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientadora: Prof. Dr. Janaína Gonçalves Maria da Silva Machado

FORTALEZA

2026

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

S235i Santos, Guilherme Pereira Barbosa dos.
Influência da granulometria e da mineralogia na qualidade dos briquetes / Guilherme Pereira
Barbosa dos Santos. – 2026.
67 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2026.
Orientação: Profa. Dra. Janaína Gonçalves Maria da Silva Machado.

1. Briquetagem. 2. Minério de ferro. 3. Granulometria. 4. Mineralogia.. I. Título.

CDD 669

GUILHERME PEREIRA BARBOSA DOS SANTOS

INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E DA MINERALOGIA NA QUALIDADE DOS
BRIQUETES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: 15 de janeiro de 2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Janaína Gonçalves Maria da Silva
Machado (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. André da Silveira Machado
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ricardo Emílio F. Quevedo Nogueira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha mãe, meu pai, minha noiva, e a toda
minha família que, com muito carinho e apoio,
não mediram esforços para que esta etapa se
concretizasse.

AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre me dar força e coragem para realizar meus objetivos.

À minha mãe, Maria Socorro Pereira da Silva, pela coragem, trabalho árduo e amor.

Ao meu pai, Antônio Ari Barbosa dos Santos, pelos conselhos e amor durante esta jornada.

A minha noiva, Ana Graziela Ribeiro de Alcântara, pelo companheirismo, incentivo, paciência e amor. E a sua família pela torcida.

À minha família e parentes que me apoiaram nessa jornada.

À minha orientadora, Prof. Janaína Gonçalves Maria da Silva Machado, por suas orientações, paciência e apoio em vários momentos difíceis nessa jornada.

Ao Prof. Dr. André da Silveira Machado pela disponibilidade e orientações que guiaram este trabalho.

Aos técnicos de laboratório do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Edipo Silva de Oliveira e Samuel Lucas Santos Medeiros, pela parceria e colaboração para o desenvolvimento desse trabalho nas medidas de Difração de Raios-X e Espectroscopia Mössbauer, principalmente no que se refere à transmissão de conhecimento.

A todos os demais colegas do Laboratório de Siderurgia que sempre estão dispostos a ajudar e sempre contribuem para o crescimento profissional dos colegas.

À Universidade Federal do Ceará e seu Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

A todos que colaboraram de maneira direta ou indireta para o desenvolvimento desse trabalho.

“Não importa o quanto a vida possa ser ruim, sempre existe algo que você pode fazer, e triunfar. Enquanto há vida, há esperança.”

(Stephen Hawking)

RESUMO

A crescente demanda por descarbonização dos processos siderúrgicos tem impulsionado a busca por alternativas capazes de reduzir significativamente as emissões de dióxido de carbono (CO_2), especialmente por meio da substituição de combustíveis fósseis e da otimização das etapas de produção do aço. Nesse contexto, os briquetes aglomerados compactos produzidos a partir de finos de minério de ferro, carvão vegetal ou resíduos siderúrgicos destacam-se como uma alternativa sustentável, uma vez que promovem melhor aproveitamento da carga nos fornos, reduzem perdas de material e possibilitam o uso de insumos com menor impacto ambiental, contribuindo para uma produção siderúrgica mais limpa e alinhada às metas globais de redução de carbono. Apesar de seu elevado potencial de aplicação, a produção de briquetes com resistências mecânicas e propriedades metalúrgicas adequadas ainda representa um desafio tecnológico atual, em função das diversas variáveis envolvidas no processo de briquetagem. Dentre essas variáveis, a granulometria e a mineralogia do minério de ferro exercem papel fundamental, uma vez que influenciam diretamente o empacotamento das partículas e o comportamento do material durante o processo de aglomeração, tornando indispensável a realização de estudos experimentais e análises sistemáticas. Neste trabalho, foram utilizados dois tipos distintos de minérios de ferro, oriundos de diferentes províncias geológicas do território brasileiro, sendo um proveniente da região do sudeste, e outro da região do nordeste. Para a caracterização dos materiais, foram realizadas análises físicas e químicas por meio da Difração de Raios-X (DRX), Espectroscopia Mössbauer (EM), Fluorescência de Raios-X (FRX) e Análise Térmica (TA), com o objetivo de investigar as diferenças na estrutura cristalina, na composição química e no comportamento térmico dos minérios, bem como seus possíveis impactos na qualidade dos briquetes produzidos. Além disso, avaliou-se a influência da granulometria e sua correlação com a resistência mecânica dos briquetes obtidos a partir de ambos os minérios. A partir das análises granulométricas, foram construídas curvas de distribuição de tamanho de partículas, as quais foram simuladas no software Elkem Materials Mixture Analyzer (EMMA) e ajustadas ao modelo de Andreassen modificado, com o objetivo de investigar o empacotamento ideal das partículas. De acordo com esse modelo, quanto mais próxima a curva granulométrica das matérias-primas estiver da curva teórica, maior será o grau de empacotamento da mistura, refletindo diretamente no aumento da resistência mecânica dos briquetes. Por fim, os briquetes produzidos foram submetidos a ensaios a frio, incluindo testes de queda, tamboreamento e compressão, a fim de avaliar sua qualidade em termos de resistência ao impacto, à abrasão e à compressão uniaxial. Os resultados obtidos evidenciam a importância do controle e do ajuste fino da granulometria e de estudos aprofundados da mineralogia do minério de ferro para a obtenção de briquetes com elevada qualidade e desempenho, reforçando o potencial dessa tecnologia como alternativa sustentável para a siderurgia.

Palavras-chave: Briquetagem. Minério de ferro. Granulometria. Mineralogia. Descarbonização.

ABSTRACT

The growing demand for decarbonization in steelmaking processes has driven the search for alternatives capable of significantly reducing carbon dioxide (CO₂) emissions, especially through the substitution of fossil fuels and the optimization of steel production stages. In this context, compact agglomerated briquettes produced from iron ore fines, charcoal, or steelmaking residues stand out as a sustainable alternative, as they promote better utilization of furnace charge, reduce material losses, and enable the use of inputs with lower environmental impact, contributing to cleaner steel production aligned with global carbon reduction targets. Despite their high application potential, the production of briquettes with adequate mechanical strength and metallurgical properties still represents a current technological challenge due to the multiple variables involved in the briquetting process. Among these variables, the particle size distribution and mineralogy of the iron ore play a fundamental role, as they directly influence particle packing and material behavior during the agglomeration process, making experimental studies and systematic analyses indispensable. In this work, two distinct types of iron ore from different geological provinces in Brazilian territory were used, one originating from the southeastern region and the other from the northeastern region. For material characterization, physical and chemical analyses were performed using X-ray Diffraction (XRD), Mössbauer Spectroscopy (MS), X-ray Fluorescence (XRF), and Thermal Analysis (TA), aiming to investigate differences in crystalline structure, chemical composition, and thermal behavior of the ores, as well as their possible impacts on the quality of the produced briquettes. Furthermore, the influence of particle size distribution and its correlation with the mechanical strength of briquettes obtained from both ores were evaluated. Based on granulometric analyses, particle size distribution curves were constructed, which were simulated in the Elkem Materials Mixture Analyzer (EMMA) software and fitted to the modified Andreassen model in order to investigate the optimal particle packing. According to this model, the closer the raw material granulometric curve is to the theoretical curve, the higher the degree of mixture packing, which directly reflects in increased mechanical strength of the briquettes. Finally, the produced briquettes were subjected to cold tests, including drop, tumbling, and compression tests, in order to evaluate their quality in terms of impact resistance, abrasion resistance, and uniaxial compressive strength. The obtained results highlight the importance of controlling and fine-tuning particle size distribution and conducting in-depth studies on iron ore mineralogy to obtain briquettes with high quality and performance, reinforcing the potential of this technology as a sustainable alternative for the steel industry.

Keywords: Briquetting. Iron ore. Particle size distribution. Mineralogy. Decarbonization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aglomerados de minério de ferro: (a) sínter, (b) pelotas e (c) briquetes.	18
Figura 2 – Princípio da compressão em prensas de rolos - Modelo 3D.	22
Figura 3 – Modelo de agitador eletromagnético acoplado com peneiras sucessivas.	30
Figura 4 – Esquema ilustrativo do fenômeno da difração de raios-X.	31
Figura 5 – Esquema de um arranjo experimental típico para Espectroscopia Mössbauer e um esboço de um espectro de transmissão.	33
Figura 6 – Esquema de funcionamento de um equipamento de termogravimetria.	35
Figura 7 – Fluxograma do processo.	38
Figura 8 – Processo de fabricação de briquetes com tratamento térmico.	40
Figura 9 – Análise Granulométrica.	41
Figura 10 – Processo de fabricação de briquetes com tratamento térmico.	44
Figura 11 – Processo de fabricação de briquetes com tratamento térmico.	45
Figura 12 – Processo de fabricação de briquetes com tratamento térmico.	47
Figura 13 – Difratograma da amostra de minério de ferro do nordeste.	48
Figura 14 – Difratograma da amostra de minério de ferro do sudeste	49
Figura 15 – Estruturas cristalinas das fases presentes no minério de ferro do nordeste.	50
Figura 16 – Estruturas cristalinas das fases presentes no minério de ferro do sudeste.	51
Figura 17 – Espectroscopia Mössbauer com minérios de ferro de diferentes regiões	53
Figura 18 – Análise térmica do minério de ferro do nordeste.	56
Figura 19 – Análise térmica do minério de ferro do sudeste.	56
Figura 20 – Análise realizada pelo software EMMA pelo modelo de Andreassen Modificado.	59
Figura 21 – Resistência à queda medida pela quantidade de material maior que 9,5 mm após submissão de 5 quedas consecutivas do material.	60
Figura 22 – Resistência ao tamboreamento medida pela quantidade de material maior que 9,5 mm após submeter a amostra a 200 rotações a uma frequência de 25 RPM.	61
Figura 23 – Força máxima medida no ensaio de compressão das diferentes amostras.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sumário de amostras utilizadas para caracterizações e produção de briquetes.	39
Tabela 2 – Análise semiquantitativa da amostra de minério de ferro do nordeste.	50
Tabela 3 – Análise semiquantitativa da amostra de minério de ferro da região do sudeste.	51
Tabela 4 – Parâmetros hiperfinos obtidos a partir dos espectros Mössbauer para as amostras de minérios de ferro.	54
Tabela 5 – Magnetic properties and Mössbauer parameters of naturally-occurring Fe ³⁺ oxides.	54
Tabela 6 – Distribuição granulométrica passante dos minérios de ferro.	57
Tabela 7 – Distribuição granulométrica e classificação das amostras	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DRX	Difração de Raios-X
EMMA	Elkem Materials Mixture Analyzer
FRX	Fluorescência de Raios-X
ICSD	Inorganic Crystal Structure Database
MS	Espectroscopia Mössbauer
TA	Análise Térmica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	Processos de Aglomeração Mineral	18
3.2	Briquetagem	19
3.3	Etapas da Briquetagem	22
3.3.1	<i>Preparação do Material</i>	22
3.3.2	<i>Mistura</i>	23
3.3.3	<i>Compactação</i>	23
3.3.4	<i>Cura</i>	24
3.4	Influência da Mineralogia na Qualidade dos Briquetes	25
3.5	Influência da Granulometria na Qualidade dos Briquetes	26
3.5.1	<i>Empacotamento de Partículas por EMMA (Elkem Materials Mix Analyser)</i>	27
3.6	Caracterização de Minério de Ferro	29
3.6.1	<i>Análise Granulométrica</i>	29
3.6.2	<i>Difração de Raios-X (DRX)</i>	30
3.6.3	<i>Espectroscopia Mössbauer</i>	32
3.6.4	<i>Análise Térmica (TG/DSC)</i>	34
3.7	Avaliação da Qualidade dos Briquetes	35
3.7.1	<i>Teste de Queda</i>	35
3.7.2	<i>Teste de Tamboreamento</i>	36
3.7.3	<i>Teste de Compressão</i>	36
4	MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1	Matéria-prima	38
4.2	Aglomerante	39
4.3	Análise da Granulometria	40
4.3.1	<i>Homogeneização e Quarteamento</i>	40
4.3.2	<i>Análise Granulométrica</i>	41
4.3.3	<i>Elkem Materials Mixture Analyzer (EMMA)</i>	42
4.4	Análise Mineralógica	43

4.4.1	<i>Difração de Raios-X (DRX)</i>	43
4.4.2	<i>Espectroscopia Mössbauer (MS)</i>	43
4.4.3	<i>Análise Termogravimétrica (TA)</i>	44
4.5	Fabricação de Briquetes	44
4.6	Avaliação da qualidade dos briquetes	45
4.6.1	<i>Teste de Queda</i>	46
4.6.2	<i>Teste de Tamboreamento</i>	46
4.6.3	<i>Teste de Compressão</i>	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.1	Difração de Raios-X (DRX)	48
5.1.1	<i>Análise de Rietveld</i>	49
5.2	Espectroscopia Mössbauer (MS)	51
5.3	Análise Térmica (TA)	55
5.4	Análise Granulométrica	57
5.4.1	<i>Elkem Materials Mixture Analyzer (EMMA)</i>	57
5.5	Avaliação da Qualidade dos Briquetes	59
6	CONCLUSÃO	63
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

A siderurgia é uma das principais bases da economia mundial, responsável pela produção de aço, material amplamente utilizado nos setores de infraestrutura, transporte, construção civil e indústria de transformação. Contudo, o setor siderúrgico é considerado um dos maiores emissores de dióxido de carbono (CO_2), representando cerca de 7 a 9% das emissões globais de gases de efeito estufa de acordo com a WORLD STEEL ASSOCIATION, 2023. Nesse cenário, a busca por soluções que permitam reduzir a pegada de carbono da cadeia produtiva do aço tem se intensificado, alinhando-se às metas globais de descarbonização e sustentabilidade estabelecidas segundo o Acordo de Paris e pela Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (1).

Uma das estratégias promissoras para mitigar impactos ambientais na siderurgia é a substituição parcial de combustíveis fósseis por fontes renováveis, como o carvão vegetal, bem como a utilização de tecnologias que maximizem o aproveitamento de matérias-primas. Entre estas, destaca-se a briquetagem, processo de aglomeração a frio na qual finos de minério de ferro, resíduos siderúrgicos e materiais carbonosos são compactados sob alta pressão para formar briquetes com dimensões e propriedades controladas. Esses briquetes apresentam vantagens como melhor empacotamento da carga nos fornos, redução de perdas de material e possibilidade de incorporar insumos de menor impacto ambiental, contribuindo para uma produção siderúrgica mais limpa e eficiente (2).

Apesar de seus benefícios, a produção de briquetes com resistência mecânica, metalúrgica e térmica adequadas ainda representa um desafio técnico. Isso se deve à complexa interação entre variáveis do processo de briquetagem, dentre elas destacam-se a mineralogia e a granulometria do minério de ferro.

A mineralogia do minério de ferro exerce influência direta e significativa sobre as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais dos aglomerados, uma vez que os diferentes minerais de ferro apresentam características cristalográficas, morfológicas e termodinâmicas distintas. Essas particularidades afetam de maneira decisiva a formação de ligações interpartículas, a coesão do material e o comportamento do minério durante os processos de aglomeração (3). De forma complementar, a granulometria influencia diretamente o fator de empacotamento das partículas e, conseqüentemente, a porosidade, a densidade aparente e a resistência mecânica final dos briquetes. Assim, a compreensão da relação entre a distribuição granulométrica e o desempenho mecânico dos aglomerados é fundamental para o desenvolvimento de briquetes com elevada qualidade e competitividade industrial (4).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da mineralogia e da granulometria na qualidade dos briquetes, a partir da análise dos minérios de ferro provenientes das regiões do sudeste e nordeste, buscando identificar as diferenças mineralógicas e granulométricas entre os materiais estudados e analisando seus impactos sobre as propriedades mecânicas dos aglomerados produzidos. Para isso, as amostras de minério de ferro foram caracterizadas mineralogicamente por meio das técnicas de Difração de Raios-X (DRX), Espectroscopia Mössbauer (MS), Fluorescência de Raios-X (FRX) e Análise Térmica (TA), com o objetivo de identificar as fases cristalográficas presentes, a composição química, a estrutura cristalina e o comportamento térmico dos minérios em elevadas temperaturas.

Adicionalmente, para a análise da influência da granulometria, foram preparadas cinco amostras com diferentes granulometrias e a partir destes materiais, foram construídas curvas de distribuição de tamanho de partículas, as quais foram simuladas no software Elkem Materials Mixture Analyzer (EMMA) e ajustadas ao modelo de Andreassen modificado com o propósito de analisar o fator de empacotamento das partículas. Tendo em vista que o modelo estabelece que quanto mais próxima a curva granulométrica das matérias-primas estiver da curva teórica, maior será o fator de empacotamento da mistura, resultando em briquetes mais densos e com maior resistência mecânica.

Por fim, os briquetes produzidos foram submetidos a ensaios a frio com testes de queda, tamboreamento e compressão seguindo as normas internacionais, a fim de avaliar sua qualidade em termos de resistência ao impacto, à abrasão e à compressão. Dessa forma, a compreensão detalhada da mineralogia e da granulometria do minério de ferro mostra-se essencial para a otimização do processo de aglomeração, em especial na produção de briquetes, pois permite a seleção adequada das matérias-primas e o ajuste dos parâmetros de processo, visando à obtenção de aglomerados com melhor desempenho mecânico e operacional.

A pesquisa apresenta relevância tanto acadêmica quanto industrial, uma vez que contribui para o avanço do conhecimento científico relacionado à briquetagem e, simultaneamente, fornece subsídios para a redução do desperdício de finos de minério e resíduos siderúrgicos, promovendo maior sustentabilidade no setor.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da mineralogia e da granulometria na qualidade dos briquetes, utilizando minérios de ferro provenientes das regiões sudeste e nordeste do país, de modo a compreender os efeitos dessas variáveis sobre o empacotamento das partículas, o comportamento do material durante o processo de aglomeração e as propriedades mecânicas finais dos briquetes produzidos. Nessa perspectiva, tem-se como objetivos específicos:

- Caracterizar mineralogicamente os minérios de ferro das regiões sudeste e nordeste por meio das técnicas de DRX, MS, FRX e TA;
- Analisar e comparar as distribuições granulométricas dos minérios, ajustando as curvas obtidas ao modelo de Andreassen modificado, com o auxílio do software EMMA, com o objetivo de identificar o grau de empacotamento das partículas destes minérios, permitindo correlacionar o fator de empacotamento da mistura granulométrica com a resistência mecânica dos briquetes produzidos;
- Produzir briquetes a partir dos minérios caracterizados e com as faixas granulométricas definidas, mantendo condições controladas de briquetagem;
- Avaliar a resistência mecânica dos briquetes produzidos por meio de ensaios a frio com teste de queda, tamboreamento e compressão uniaxial seguindo as normas internacionais como padrão para os ensaios;
- Correlacionar os resultados obtidos nas caracterizações mineralógicas e granulométricas com o desempenho mecânico dos briquetes nos testes a frio, identificando os parâmetros mais relevantes para a obtenção de briquetes de elevada qualidade.
- Definir a faixa granulométrica ideal para produção de briquetes com propriedades mecânicas adequadas em termos de aplicação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processos de Aglomeração Mineral

O beneficiamento do minério de ferro resulta em diferentes classes de produtos, definidos principalmente pela sua granulometria. De modo geral, esses produtos podem ser classificados em: granulado (lump ore), composto por partículas com dimensões superiores a 6,3 mm; sinter feed, formado por partículas finas, com tamanhos variando entre 0,15 mm e 6,3 mm; e pellet feed, constituído por partículas ultrafinas, com granulometria inferior a 0,15 mm.

Figura 1 – Aglomerados de minério de ferro: (a) sinter, (b) pelotas e (c) briquetes.



Fonte: Oliveira et al. (5).

Dentre essas frações, os minérios de ferro finos e ultrafinos apresentam maior dificuldade de aproveitamento nos processos siderúrgicos. Tal limitação ocorre, principalmente, porque essas partículas reduzem a permeabilidade dos leitos de carga, comprometendo a passagem homogênea dos gases redutores nos reatores. Além disso, os finos tendem a ser facilmente arrastados pelo fluxo gasoso, ocasionando maiores perdas de material e contribuindo para o aumento das emissões particuladas na atmosfera (6).

Diante desse cenário, torna-se essencial a adoção de processos que possibilitem o aproveitamento eficiente desses materiais, assegurando maior facilidade de manuseio, transporte e utilização industrial. Nesse contexto, os processos de aglomeração representam uma solução tecnológica viável, permitindo a transformação de finos e ultrafinos em aglomerados com propriedades físicas e mecânicas adequadas ao uso em fornos e reatores.

Na indústria mínero-metalúrgica, destacam-se três processos principais de aglomeração de finos: sinterização, pelletização e briquetagem, que resultam, respectivamente, na produção de sinter, pelotas e briquetes conforme evidenciado pela Figura 1. A briquetagem, em particular, consiste na compactação dos finos sob elevada pressão, podendo ou não contar com a adição de ligantes ou aglomerantes. Esse processo resulta em produtos com formato, dimensões

e resistência mecânica adequados para posterior utilização (7).

Comparada aos métodos convencionais, a briquetagem apresenta vantagens relevantes. Diferentemente da sinterização e da pelletização, não requer temperaturas elevadas, o que reduz significativamente o consumo energético e as emissões de CO_2 . Além disso, trata-se de um processo de menor complexidade operacional, menos intensivo em capital e mais flexível quanto à granulometria e ao tipo de matéria-prima utilizada. Essa flexibilidade possibilita a incorporação não apenas de minérios finos de ferro, mas também de subprodutos e resíduos da indústria do ferro e do aço, promovendo maior eficiência no aproveitamento de recursos e contribuindo para a redução de impactos ambientais.

Diante dessas vantagens, em especial a menor emissão de CO_2 , observa-se um interesse crescente, tanto no meio industrial quanto acadêmico, pelo estudo da briquetagem como rota alternativa para a aglomeração de finos de minério de ferro. A adoção dessa tecnologia pode gerar benefícios econômicos, ambientais e operacionais, alinhando-se às metas de sustentabilidade do setor minero-metalúrgico. Nesse sentido, a utilização de briquetes desponta como uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente mais adequada, impulsionando a inovação e o desenvolvimento de novas soluções nesse campo.

3.2 Briquetagem

A crescente preocupação com as questões ambientais, refletida em legislações cada vez mais rigorosas, aliada à necessidade econômica de reaproveitar resíduos industriais e partículas finas geradas durante o beneficiamento de minérios, fez da briquetagem uma alternativa estratégica para a indústria mineral. Por meio dessa técnica de aglomeração, materiais tradicionalmente descartados, como finos de carvão mineral e vegetal, rejeitos de minérios, turfa, plásticos, resíduos biológicos, limalhas metálicas, entre outros, passaram a ser reincorporados à cadeia produtiva, seja como fonte de energia, seja como matéria-prima para novos produtos (8).

O desenvolvimento da briquetagem tem origem no século XIX, com a concessão da primeira patente americana (Methods of Converting Fine Coal into Solid Lumps, USA Patent Office n. 5.739) a William Easby, em 1848. O estudo de Easby descrevia a compactação de finos de carvão mineral em aglomerados sólidos de diferentes tamanhos e formatos por meio de alta pressão, possibilitando transformar um material de baixo ou nenhum valor agregado em um combustível de alto poder calorífico. Essa inovação favoreceu a utilização de rejeitos provenientes do beneficiamento do carvão, tornando-os aproveitáveis em máquinas a vapor,

forjas, cozinhas e outros equipamentos da época (8).

A adoção industrial da briquetagem ocorreu no final do século XIX, impulsionada pela crise econômica que incentivou soluções para reduzir desperdícios e maximizar o uso de insumos energéticos. Nos Estados Unidos, o processo passou a ser aplicado comercialmente no tratamento de partículas menores que 6 mm, que após secagem eram misturadas com cerca de 6% de asfalto fundido e submetidas a prensas de rolos, formando briquetes sólidos. Esses briquetes eram posteriormente secos em transportadores de correia e destinados à comercialização (8).

Na primeira metade do século XX, especialmente no período que antecedeu a popularização de aquecedores domésticos a óleo diesel e gasolina, a produção anual de briquetes de carvão mineral ultrapassava 6 milhões de toneladas nos Estados Unidos e em diversos países da Europa. Embora o consumo tenha diminuído em algumas regiões mais frias devido ao avanço de outras tecnologias energéticas, o carvão mineral permanece até hoje como o principal insumo briquetado. Além disso, a técnica tem sido aplicada na briquetagem parcial de carvões destinados à coqueificação, o que melhora a qualidade do coque, aumenta sua densidade e permite a utilização de carvões com baixo potencial coqueificante, ampliando sua viabilidade industrial (8).

No Brasil, o desenvolvimento da briquetagem em escala industrial teve início na década de 1960, quando a Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira (CSBM), em sua unidade de João Monlevade (MG), implantou uma linha de produção para o aproveitamento de finos de carvão vegetal, utilizando prensas da empresa alemã Humboldt. Poucos anos depois, em 1965, foi fundada a Companhia Brasileira de Briquetes, em Mateus Leme (MG), que passou a fabricar briquetes de carvão vegetal para uso doméstico e industrial, além de desenvolver equipamentos e instalações específicas para o setor (8).

Na década de 1970, novas iniciativas consolidaram a tecnologia no país. Em 1974, a Empresa Carvel, sediada em Contagem (MG), iniciou a produção de prensas para briquetagem e ampliou o uso da técnica, aplicando-a na compactação de diferentes materiais, como o carbonato de sódio utilizado na dessulfuração de gusa em usinas siderúrgicas integradas (8).

O uso da briquetagem como ferramenta estratégica para a economia circular no setor siderúrgico ganhou força nos anos 1990. Em 1994, a Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), atual ArcelorMittal Tubarão, implantou uma unidade experimental de briquetagem para o aproveitamento de lama de aciaria e outros resíduos do processo de produção de aço, com capacidade instalada de aproximadamente 20 mil toneladas mensais. Essa iniciativa representou

um marco para a adoção do processo como solução para o reaproveitamento de rejeitos e redução de custos operacionais (8).

A briquetagem é um processo de aglomeração que promove a densificação de materiais por meio da aplicação de pressão, sendo considerada uma técnica eficiente para dar forma e utilidade a partículas finas. O método consiste na compressão do material em um molde ou matriz, responsável por definir as dimensões e o formato final do briquete. O processo pode ocorrer com ou sem o uso de aglomerantes e pode ser realizado tanto em temperatura ambiente quanto em altas temperaturas, no chamado processo de briquetagem a quente. A compactação resulta em significativa redução do volume do material, o que, além de otimizar aspectos tecnológicos, possibilita um transporte e armazenamento mais econômicos (7).

Entre os equipamentos utilizados, destacam-se as prensas de rolos, ilustrado na Figura 2. No processo de briquetagem por prensa de rolos, a mistura de finos é alimentada continuamente na abertura entre dois rolos que giram em sentidos opostos, mantendo velocidades iguais. A superfície dos rolos é equipada com cavidades ou moldes simetricamente distribuídos, projetados para formar semi-briquetes de dimensões e geometria definidas. Durante a rotação, as cavidades convergem, aprisionando o material e submetendo-o a uma compressão bilateral, cuja magnitude depende da força aplicada pelos rolos, do diâmetro das cavidades e da densidade inicial da mistura. Esse processo promove uma distribuição homogênea da densidade e integridade estrutural ao longo do volume do briquete, fator crítico para a resistência mecânica e manuseio subsequente (9).

A velocidade de rotação dos rolos e a taxa de alimentação influenciam diretamente o tempo de permanência do material sob compressão, afetando a densidade aparente e a resistência final do briquete. Além disso, características da mistura, como granulometria, umidade e proporção de ligantes, impactam a compactação e a coesão do produto final. À medida que os rolos giram e as cavidades se afastam, os briquetes formados são liberados por ação da gravidade, completando o ciclo de moldagem e ficando prontos para transporte ou utilização nos processos industriais subsequentes.

Figura 2 – Princípio da compressão em prensas de rolos - Modelo 3D.



Fonte: Oliveira et al (5)

3.3 Etapas da Briquetagem

O processo de briquetagem pode ser dividido em quatro etapas principais: preparação, mistura, compactação e tratamento térmico.

3.3.1 *Preparação do Material*

O preparo do material é uma etapa fundamental na briquetagem de minério de ferro, pois influencia diretamente a qualidade e o desempenho do produto final. Inicialmente, é necessário caracterizar o material a ser compactado, avaliando aspectos como granulometria, teor de ferro, umidade e demais propriedades relevantes. Com base nesses dados, definem-se os parâmetros do processo, incluindo a pressão de compactação, a taxa de alimentação e a umidade ideal. Em determinadas situações, pode ser preciso realizar uma etapa de cominuição, a fim de adequar o tamanho das partículas para a briquetagem (7).

3.3.2 *Mistura*

A etapa de mistura é fundamental para a obtenção de briquetes de qualidade e dentro das especificações exigidas. Nela, os componentes são combinados em proporções adequadas, resultando em uma massa homogênea que pode ser compactada e moldada. Uma mistura bem realizada garante a distribuição uniforme do minério, dos ligantes, da água e de outros aditivos, como agentes redutores e fundentes, o que contribui diretamente para a resistência e o desempenho do produto final.

Os materiais utilizados podem variar conforme as características desejadas do briquete e as exigências do processo de briquetagem. Na indústria siderúrgica, os mais comuns são os aglomerantes, a água e aditivos específicos, responsáveis por conferir maior qualidade ao produto.

Nas plantas industriais, é prática comum o uso de misturadores de alta intensidade, como tambores rotativos verticais ou inclinados, que permitem manipular grandes volumes de material e assegurar a uniformidade da mistura. Em escala laboratorial, utilizam-se equipamentos mais simples, como a tigela rotativa, em que o processo de homogeneização dura, em média, de 3 a 10 minutos. Uma mistura adequada promove maior número de pontos de ligação entre as partículas, resultando em briquetes mais resistentes (10).

De acordo com Carvalho e Brinck et al (8), é essencial que a mistura esteja suficientemente seca no condicionador, localizado entre o misturador e a prensa, para evitar problemas. Caso contrário, o vapor d'água pode permanecer preso durante a compactação e, ao ser liberado após a prensagem, provocar fraturas nos briquetes. Além disso, em materiais com baixa densidade aparente, recomenda-se a remoção de grandes volumes de ar antes da compactação. Para isso, alimentadores a vácuo podem ser utilizados, assegurando maior eficiência no processo.

3.3.3 *Compactação*

Na etapa de compactação, a pressão aplicada sobre a mistura aumenta progressivamente à medida que o material passa entre os rolos, desde o início da compressão até alcançar o ponto de menor distância entre eles. Após atingir o valor máximo, a pressão é rapidamente reduzida, liberando o aglomerado formado. Assim, inicialmente, o material recebe uma pressão moderada, que rompe estruturas mais soltas e favorece a aderência entre as partículas (8).

Em seguida, a massa é conduzida para a zona de compressão máxima, onde a pressão

elevada promove a união das partículas e a ativação dos ligantes ou aditivos, garantindo a formação do briquete.

A pressão aplicada nas prensas de rolos pode variar entre 40 e 150 MPa. Contudo, deve-se atentar para que valores excessivos não comprometam a porosidade do briquete, reduzindo seu desempenho metalúrgico em processos de redução. Além disso, o tempo de prensagem também influencia a resistência mecânica. Para briquetes de minério de ferro, recomenda-se que a rotação dos rolos varie entre 6-8 RPM. Por fim, os briquetes formados são removidos da prensa por meio de sulcos ou canaletas presentes nas superfícies dos rolos, que permitem sua ejeção de maneira contínua (9).

3.3.4 Cura

A etapa de cura é fundamental para conferir resistência mecânica aos briquetes, garantindo que eles possam suportar etapas posteriores, como o transporte, o empilhamento e, por fim, a sua utilização. Logo após a prensagem, os briquetes ainda são considerados “verdes” e podem passar por secagem em temperatura ambiente ou seguir diretamente para um processo de tratamento térmico.

Segundo Nheta et al (11), a escolha entre a cura em temperatura ambiente ou o tratamento térmico depende tanto do tipo de ligante ou aditivo utilizado quanto das propriedades desejadas no produto final. Em alguns casos, são empregados ligantes que não necessitam de aquecimento, como os autoadesivos ou aglomerantes químicos que reagem naturalmente em condições ambientes. Em outros sistemas, entretanto, torna-se indispensável o tratamento térmico, cujos parâmetros — temperatura e tempo de exposição — variam conforme os materiais empregados e as características desejadas para os briquetes.

O tratamento térmico geralmente é realizado em estufas, fornos ou câmaras específicas, onde os briquetes são expostos a condições controladas de aquecimento. Nesse processo, ocorre a evaporação da umidade residual e a ativação dos ligantes, o que fortalece a estrutura do briquete (7). De maneira geral, a cura de aglomerados obtidos por briquetagem é conduzida a temperaturas mais baixas e/ou por períodos de tempo menores quando comparada aos processos de pelletização ou sinterização (10). Essa característica torna a briquetagem um processo atrativo, já que a utilização de temperaturas mais brandas implica menores custos operacionais e reduzidas emissões de CO_2 (12).

3.4 Influência da Mineralogia na Qualidade dos Briquetes

A mineralogia do minério de ferro exerce influência direta sobre o comportamento físico, microestrutural e mecânico dos aglomerados, uma vez que os diferentes minerais de ferro apresentam características cristalográficas, morfológicas e termodinâmicas distintas. Essas diferenças afetam o empacotamento das partículas, a formação de ligações interpartículas e a evolução da microestrutura durante os processos de aglomeração, como sinterização, pelletização e briquetagem. Estudos comparativos indicam que a natureza mineralógica do minério condiciona propriedades como porosidade, densidade, resistência mecânica e estabilidade estrutural dos aglomerados (3).

A hematita (Fe_2O_3) é o mineral de ferro mais comum em depósitos de alto teor e apresenta estrutura cristalina do tipo romboédrica. Minérios predominantemente hematíticos tendem a apresentar partículas mais compactas, com menor porosidade intrínseca e maior estabilidade térmica (3), aglomerados produzidos a partir de minérios hematíticos apresentam microestrutura mais densa e homogênea, o que favorece o desenvolvimento de ligações interpartículas mais eficientes.

Essas características refletem-se em melhores propriedades mecânicas, especialmente em termos de resistência à compressão e menor geração de finos durante manuseio e transporte. Além disso, a menor perda de massa associada à ausência de água estrutural contribui para maior estabilidade dimensional durante o aquecimento, aspecto relevante para aplicações metalúrgicas.

A goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) caracteriza-se pela presença de água estrutural em sua rede cristalina, o que confere aos minérios goethíticos elevada porosidade, maior área superficial específica e morfologia mais irregular (3), essas características favorecem a formação inicial de aglomerados, devido ao maior número de pontos de contato entre partículas; contudo, a liberação de água estrutural durante o aquecimento provoca modificações significativas na microestrutura.

A desidroxilação da goethita resulta na formação de hematita secundária, acompanhada pela geração de poros adicionais, o que pode comprometer a resistência mecânica final dos aglomerados. Assim, embora minérios goethíticos possam apresentar boa aglomerabilidade a frio, o controle da granulometria e das condições térmicas torna-se essencial para evitar a degradação estrutural e a redução da resistência mecânica.

A magnetita (Fe_3O_4) possui estrutura cristalina cúbica do tipo espinélio inverso e apresenta comportamento distinto em relação à hematita e à goethita (3), minérios magnetíticos tendem a apresentar maior reatividade química, especialmente em ambientes oxidantes, onde

ocorre a transformação da magnetita em hematita.

Essa transformação pode contribuir positivamente para a formação de ligações sólidas entre partículas, favorecendo o aumento da resistência mecânica dos aglomerados. Entretanto, a ocorrência de mudanças volumétricas associadas à oxidação pode gerar tensões internas e afetar a estabilidade microestrutural, exigindo controle rigoroso das condições de processo.

A comparação entre minérios hematíticos, goethíticos e magnetíticos evidencia que a mineralogia exerce papel determinante no desempenho dos aglomerados. Enquanto minérios hematíticos tendem a gerar aglomerados mais densos e mecanicamente resistentes, os minérios goethíticos apresentam maior complexidade microestrutural devido à presença de água estrutural, e os magnetíticos exibem comportamento intermediário, fortemente dependente das condições de oxidação.

Dessa forma, a seleção adequada da matéria-prima mineralógica, associada ao controle da granulometria e dos parâmetros de aglomeração, é fundamental para a obtenção de briquetes com propriedades mecânicas e operacionais compatíveis com as exigências da indústria siderúrgica.

3.5 Influência da Granulometria na Qualidade dos Briquetes

De acordo com Kurunov e Bizhanov et al (9), o tamanho máximo de partícula recomendado para o processo de briquetagem por rolo situa-se, em geral, entre 5 e 6 mm. No entanto, a presença de partículas menores, característica de misturas multifracionais, pode exercer papel importante na eficiência do processo. Isso porque as partículas finas tendem a preencher os espaços vazios entre as maiores, reduzindo a presença de ar e contribuindo para uma compactação mais eficiente do material.

Olugbade e Ojo et al (13) também destacam que o aumento da proporção de partículas pequenas e finas favorece a formação de ligações mais consistentes entre as partículas, uma vez que há maior área de contato entre elas. Essa condição resulta em briquetes com maior coesão interna e, conseqüentemente, em melhor resistência à compressão.

Resultados semelhantes foram obtidos por Li et al (14), que analisaram, por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), a microestrutura de briquetes produzidos com minérios de ferro de diferentes granulometrias. O estudo mostrou que os briquetes fabricados com mistura de granulometria heterogênea apresentaram desempenho superior nos testes de queda quando comparados àqueles produzidos com granulometria homogênea, evidenciando a

importância da combinação entre frações grossas e finas no processo.

De forma complementar, Narita et al (15) investigaram o efeito do tamanho das partículas de minério de ferro e carvão sobre a resistência ao impacto e à compressão de briquetes compostos. Observou-se que a resistência aumentou à medida que o tamanho das partículas de minério de ferro diminuiu. Especificamente, quando o tamanho das partículas foi reduzido de -4 mm para -0,1 mm, mantendo-se o carvão em -1 mm, a resistência ao impacto cresceu dez vezes, enquanto a resistência à compressão atingiu 229,7 N por briquete. Esses resultados reforçam a influência direta da distribuição granulométrica na qualidade e no desempenho final dos briquetes.

3.5.1 Empacotamento de Partículas por EMMA (Elkem Materials Mix Analyser)

A distribuição do tamanho de partículas de minérios de ferro visando otimizar o fator de empacotamento das partículas é obtido com auxílio do programa EMMA uma ferramenta amplamente utilizada para otimização de empacotamento granulométrico de materiais cerâmicos e cimentícios (16). O software baseia-se em trabalhos clássicos que estabeleceram fundamentos teóricos para o comportamento de partículas em misturas complexas.

No que diz respeito à granulometria e à distribuição das partículas, o fator de empacotamento é uma característica de grande importância. Em termos gerais, quanto maior esse fator, menor será a fração inicial de vazios no material, resultando em um sólido menos poroso e, conseqüentemente, mais resistente. Esse conceito é amplamente estudado e aplicado em setores como a indústria cerâmica e a produção de concretos, nos quais existe uma correlação conhecida entre a densidade final dos corpos e a sua resistência mecânica segundo estudos realizados por Castro et al (17).

A partir da observação de que partículas menores tendem a ocupar os espaços vazios entre partículas maiores, surgiram modelos teóricos de distribuição granulométrica que visam otimizar o empacotamento. Essa lógica estabelece que, sucessivamente, partículas cada vez menores podem preencher novos interstícios, aumentando a densidade de empacotamento e aproximando-se de uma densidade teórica máxima.

Com base nesses conceitos, Furnas et al (18) desenvolveu um modelo que correlaciona diretamente a distribuição granulométrica com a resistência mecânica dos briquetes. Apesar de apresentar uma proposta eficiente para otimização do empacotamento, trata-se de um modelo de difícil aplicação prática por ser baseado em uma distribuição discreta de partículas.

No entanto, no modelo teórico proposto por Andreassen, também conhecido como modelo de Andreassen, verificou-se que, em processos de compactação e formação de misturas com mínima presença de ar, o empacotamento ideal ocorre quando a distribuição granulométrica pode ser descrita pela seguinte equação:

$$CPFT(\%) = \left(\frac{d}{D}\right)^q \cdot 100. \quad (3.1)$$

onde CPFT é a porcentagem cumulativa (volume) mais fina que as partículas com diâmetro d , d é o diâmetro da partícula, D é o diâmetro maior da partícula e q é o coeficiente de distribuição.

Esse modelo descreve uma relação linear de empacotamento entre as frações de partículas retidas em peneiras sucessivas e a quantidade acumulada que as atravessa, representando de forma simplificada o processo de densificação das misturas. Embora seja um modelo empírico de distribuição granulométrica contínua e de aplicação relativamente simples, apresenta limitações no ajuste quando se consideram as frações mais finas das partículas.

Buscando superar essas limitações, Dinger e Funk et al (19) combinaram os modelos anteriores e criaram o chamado modelo de Andreassen modificado, que apresenta maior flexibilidade e melhor representação da fração fina da distribuição. Este modelo é expresso pela seguinte equação:

$$CPFT(\%) = \frac{(D^q - D_S^q)}{(D_L^q - D_S^q)} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Sendo D o tamanho médio de partícula, D_L o tamanho máximo de partícula, D_S o tamanho mínimo de partícula e q é o coeficiente de distribuição que alcança valores de empacotamento máximo para qualquer valor menor que $q = 0,37$. D_L e D_S devem ser parâmetros escolhidos baseado na faixa granulométrica relevante para o processo estudado. Por outro lado, q é um parâmetro que depende do tipo das características do material e processo que está sendo estudado, sendo o valor de $q = 0,28$ encontrado na literatura como referência para a briquetagem. Quanto mais próximo a curva distribuição das matérias-primas da curva de estiver da curva teórica de distribuição, mais empacotado será a mistura granulométrica.

Uma vantagem do modelo de Andreassen é que ele não exige a definição de um diâmetro mínimo de partícula, admitindo a existência de uma sequência contínua de partículas decrescentes. Assim, o valor de CPFT pode ser igual a zero sem impacto significativo na densidade teórica do material. Já o modelo modificado, ajusta a curva granulométrica para

contemplar partículas ultrafinas, frequentemente presentes em resíduos e finos de minério de ferro. A Figura abaixo ilustra a diferença de ajuste em tamanho de partículas mais finas simuladas no software EMMA entre os modelos propostos.

Para a aplicação prática do EMMA na briquetagem de minério de ferro, é necessário fornecer ao programa a distribuição de tamanho de partícula (DPS) de cada componente da mistura, bem como informações sobre densidade dos materiais constituintes, módulo de distribuição, tamanho máximo de partícula, proporção de cada material e teor de água. A partir desses dados, o EMMA calcula o DPS ideal de toda a mistura e o compara às curvas teóricas do modelo de Andreassen ou de sua versão modificada.

Esse procedimento permite projetar misturas de briquetes com empacotamento mais denso, maior resistência mecânica e menor porosidade, além de reduzir a necessidade de ligantes, o que representa ganhos econômicos e operacionais no processo. Diversos estudos anteriores já comprovaram a eficácia do uso do software na otimização de projetos de mistura para materiais particulados em diferentes aplicações industriais, o que reforça sua relevância também no contexto da briquetagem de minério de ferro.

3.6 Caracterização de Minério de Ferro

A caracterização de minério de ferro tem como finalidade compreender os aspectos químicos, físicos, e metalúrgicos associados às suas características intrínsecas. Para este objetivo, empregam-se distintas técnicas analíticas, descritas abaixo.

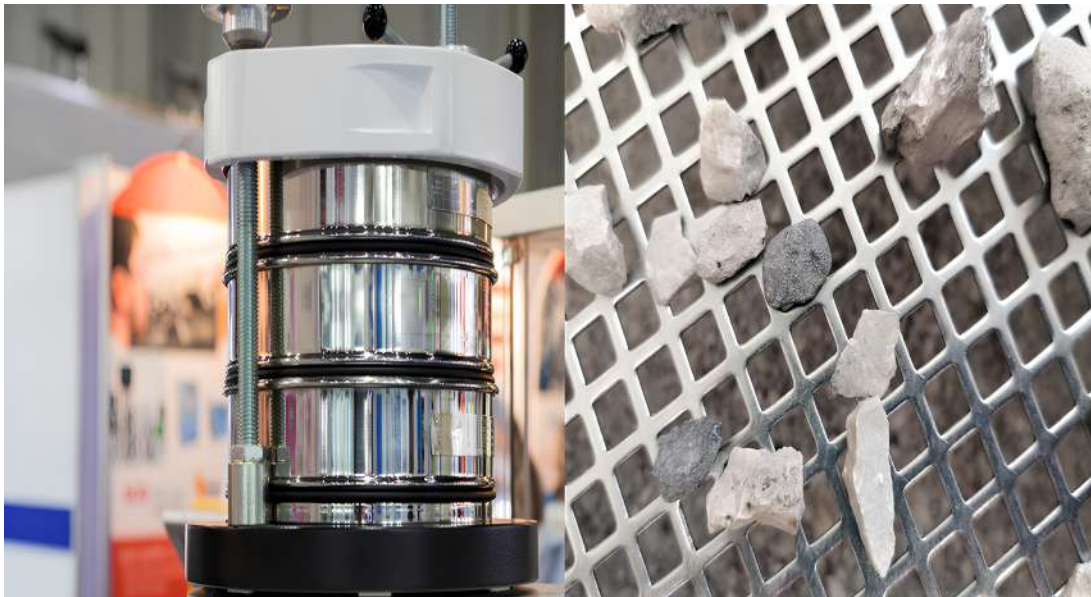
3.6.1 *Análise Granulométrica*

A análise granulométrica é uma etapa essencial na caracterização física do minério de ferro, pois permite determinar a distribuição do tamanho das partículas que compõem a amostra. Essa informação é de extrema importância para o controle e a otimização de processos como britagem, moagem, peneiramento, pelotização e briquetagem, uma vez que o tamanho das partículas influencia diretamente a reatividade, a permeabilidade e o desempenho do material nos processos metalúrgicos subsequentes.

De acordo com a ABNT NBR ISO 4701:2004 — Minérios de ferro e pré-reduzidos: Determinação da distribuição granulométrica por peneiramento, o método consiste na separação das partículas em diferentes faixas de tamanho, utilizando peneiras de aberturas padronizadas,

de acordo com a Figura 3. A norma estabelece procedimentos para peneiramento a seco e a úmido, especificando que o método deve ser escolhido conforme as características do material e o objetivo da análise. Para minérios com baixa umidade e sem tendência à aglomeração, o peneiramento a seco é o mais adequado, por proporcionar rapidez e boa reprodutibilidade dos resultados.

Figura 3 – Modelo de agitador eletromagnético acoplado com peneiras sucessivas.



Fonte: Soares de Moraes et al (20)

3.6.2 Difração de Raios-X (DRX)

A DRX é um fenômeno físico que ocorre a partir da interação entre um feixe de raios X incidente e os elétrons presentes nos átomos que compõem um material. Esse processo está associado ao espalhamento coerente da radiação, resultando em um padrão característico que depende da estrutura interna da amostra. A técnica baseia-se na incidência de um feixe de raios X sobre o material e na posterior detecção dos fótons difratados, que formam o chamado feixe difratado.

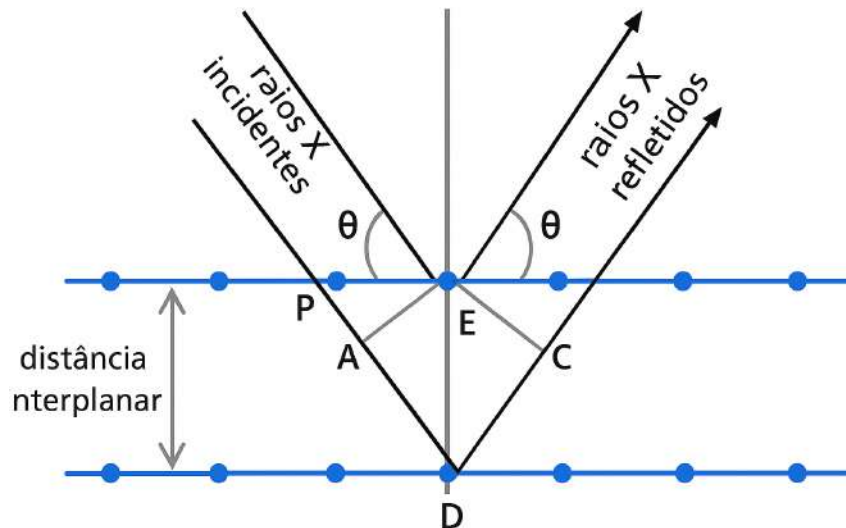
Em materiais cristalinos, nos quais os átomos estão dispostos de forma periódica no espaço, o fenômeno da difração ocorre em direções específicas de espalhamento que obedecem à Lei de Bragg. Essa lei descreve as condições necessárias para que as ondas refletidas pelos diferentes planos atômicos interfiram de maneira construtiva, produzindo picos de intensidade observáveis no difratograma segundo Cullity et al (21).

Considerando um feixe monocromático de comprimento de onda λ incidindo sobre um cristal a um ângulo θ , denominado ângulo de Bragg, a condição de difração é expressa por:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (3.3)$$

em que θ representa o ângulo formado entre o feixe incidente e os planos cristalinos, d é a distância interplanar ou seja, o espaçamento entre os planos de átomos e n corresponde à ordem de difração. A Figura 4 ilustra de forma esquemática a aplicação da Lei de Bragg, evidenciando a relação entre o feixe incidente, o feixe difratado e os planos interplanares (22).

Figura 4 – Esquema ilustrativo do fenômeno da difração de raios-X.



Fonte: Elaborado pelo autor

O feixe difratado, obtido na análise por DRX, é representado por picos de intensidade que se destacam do background (linha de base). Esses picos são registrados em um espectro de intensidade em função do ângulo 2θ (ou da distância interplanar d), formando o chamado padrão de difração (22).

As intensidades observadas em determinados ângulos 2θ correspondem à difração do feixe incidente por planos cristalinos específicos, que possuem a mesma distância interplanar e são identificados pelos índices de Miller (hkl). Assim, cada pico presente no difratograma representa uma reflexão associada a um conjunto de planos do cristal, e cada reflexão possui características próprias como intensidade, posição angular (2θ) que permitem a identificação

das fases cristalinas presentes na amostra. Cada composto cristalino apresenta um padrão difratométrico característico, possibilitando sua identificação com base nas posições angulares e nas intensidades relativas dos picos difratados (22).

No estudo de materiais policristalinos como no caso de minério de ferro, na qual é analisada em forma de pó sobre incidência de raios X. Cada partícula deste pó vai se comportar como um pequeno cristal, com orientação aleatória em relação ao feixe de raios X incidente. O inconveniente da técnica se deve à sobreposição de reflexões dos componentes, misturando as informações contidas na intensidade e dificultando a análise de um agregado com número excessivo de compostos cristalinos (22).

Embora a técnica de DRX seja amplamente aplicada, permitindo o mapeamento das redes cristalinas presentes no material por meio da formação do padrão de difração, na qual cada conjunto de picos difratométricos está associado a fases cristalinas específicas, o que permite a identificação de compostos presentes na amostra. Entretanto, em sistemas policristalinos, notadamente em amostras de minério de ferro, a sobreposição de picos pode dificultar a interpretação, sendo a espectroscopia mössbauer uma análise complementar para identificar a natureza e a estrutura cristalina das fases ferríferas.

3.6.3 Espectroscopia Mössbauer

O Efeito Mössbauer consiste na absorção ressonante de radiação gama sem recuo nuclear, descoberto pelo físico alemão Rudolf Ludwig Mössbauer (1929–2011) durante seus estudos de doutorado na Universidade Técnica de Munique no ano de 1957 e de seus experimentos conduzidos no Instituto Max Planck de Pesquisa Médica, em Heidelberg, Alemanha.

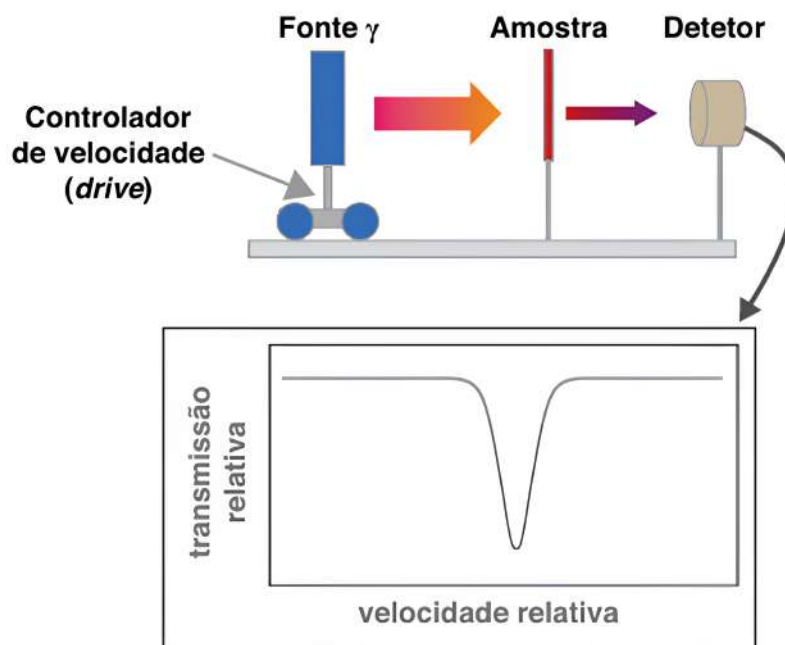
Até então, não havia comprovação experimental direta do fenômeno de ressonância nuclear em condições análogas às observadas para as ressonâncias ópticas, associadas a transições eletrônicas. A principal dificuldade em detectar a ressonância nuclear estava relacionada ao recuo atômico que ocorre durante os processos de emissão e absorção de raios gama, radiações de energia significativamente superior (entre 10^3 eV a 10^5 eV) quando comparadas às radiações ópticas, que possuem energia da ordem de (1 eV a 10 eV) (23).

Desta forma, o fenômeno físico conhecido como Efeito Mössbauer é a absorção ressonante para energias relacionadas a transições entre estados nucleares quando as energias de recuo E_R do núcleo emissor e do núcleo absorvedor podem ser desprezadas, ou seja, E_R deve ser muito menos que a largura natural de emissão e absorção nuclear. Num sólido, E_R pode ser

desprezada pelo menos para uma pequena fração das emissões de raios gama, assim como das absorções, para as quais o núcleo não tem liberdade para recuar por não haver quebra da ligação química e estados permitidos de vibração com energia adequada (23).

O ensaio de Mössbauer como mencionado baseia-se na absorção ressonante de radiação gama por núcleos atômicos em um sólido, sem perda de energia por recuo. Nesse ensaio, uma fonte de raios gama é movimentada com velocidade controlada em relação à amostra, produzindo um pequeno ajuste na energia dos fótons por meio do efeito Doppler. Quando a energia da radiação incidente coincide com a diferença entre os níveis nucleares do átomo absorvedor presente na amostra, ocorre a absorção ressonante, reduzindo a intensidade da radiação transmitida e detectada. O registro da transmissão relativa em função da velocidade da fonte resulta em um espectro característico, a partir do qual é possível obter informações sobre o estado químico, o ambiente eletrônico e as interações magnéticas dos núcleos na amostra, conforme Figura 5.

Figura 5 – Esquema de um arranjo experimental típico para Espectroscopia Mössbauer e um esboço de um espectro de transmissão.



Fonte: Pires et al (24)

Essa técnica possibilita o estudo de transições nucleares em átomos incorporados em uma matriz sólida, oferecendo informações altamente específicas e seletivas sobre o elemento

químico em análise (23).

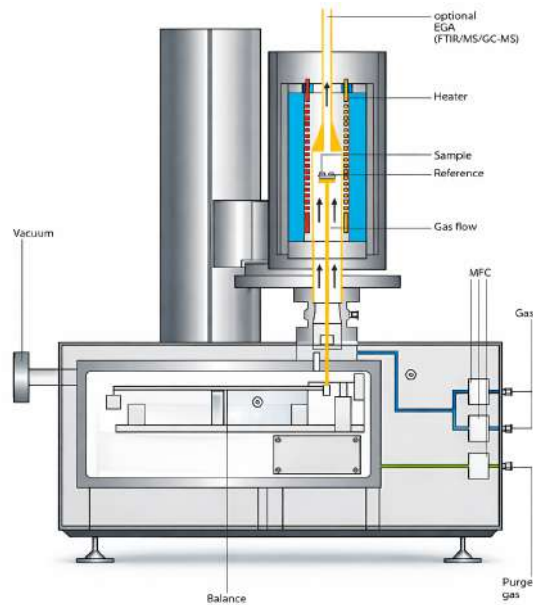
A ampla aplicabilidade da MS em diversas áreas do conhecimento, como física, química, mineralogia, geologia, arqueologia, biologia e medicina, deve-se à sua alta sensibilidade e seletividade para o elemento químico de interesse. Além disso, a técnica permite investigar transições nucleares de baixas energias, fornecendo informações detalhadas sobre ligações químicas, estruturas moleculares, distribuição eletrônica ao redor dos átomos e parâmetros nucleares locais.

3.6.4 *Análise Térmica (TG/DSC)*

A TA, ou termogravimetria, é um dos principais ensaios térmicos utilizados na caracterização de materiais. Esse ensaio mede a variação de massa da amostra em função da variação de temperatura na qual o material está submetido. Um gráfico da massa ou do percentual da massa em função do tempo é chamado de termograma ou curva de decomposição térmica. Já a Termogravimetria Derivada (DTG), nada mais é do que um arranjo matemático, no qual a derivada da variação de massa em relação ao tempo (dm/dt) é registrada em função da temperatura ou tempo. Em outras palavras, a DTG é a derivada primeira da TGA (25).

O equipamento da análise termogravimétrica é composto por uma termobalança, sendo um instrumento que permite a pesagem contínua de uma amostra em função da temperatura com sensibilidade da ordem de $0,1 \mu\text{g}$, forno, cadinho de alumina com capacidade geralmente de até 1 g, sensor de temperatura, programador de temperatura do forno, sistema registrador e controle da atmosfera do forno. A Figura 6 representa um equipamento de termogravimetria genérico (25).

Figura 6 – Esquema de funcionamento de um equipamento de termogravimetria.



Fonte: Gaisford et al (24)

Para análises em minérios de ferro, o ensaio de TGA permite determinar o teor de umidade, de voláteis e de cinza.

3.7 Avaliação da Qualidade dos Briquetes

Devido à alta variabilidade de processos e formas de briquetes produzidos, não há uma padronização clara em relação aos testes que avaliam as propriedades físicas e mecânicas desejadas dos briquetes, apesar de trabalhos nesse sentido já terem sido realizados. No entanto, observa-se na literatura que os principais ensaios empregados, de forma consensual, são os testes de queda, compressão e tamboreamento, por representarem os esforços típicos aos quais os briquetes são submetidos em condições industriais, como manuseio, transporte, estocagem e alimentação em reatores.

3.7.1 Teste de Queda

O ensaio consiste em submeter os briquetes a quedas sucessivas a partir de uma altura previamente definida, promovendo a fragmentação progressiva da amostra. Magdziarz et al aplicou esse método em briquetes com diâmetro médio de 2,0 cm, realizando dez quedas sobre uma placa de aço, sendo o desempenho avaliado pelo percentual de material retido após

peneiramento em malha correspondente a dois terços do diâmetro médio do briquete (26). Metodologias semelhantes foram posteriormente empregadas por outros autores, com variações nos parâmetros experimentais, como a altura de queda, o número de repetições, o material da superfície de impacto e a abertura da peneira utilizada. Tanaka et al, por exemplo, adotou alturas variando entre 30 cm e 1,50 m e entre três e dez quedas, de acordo com o tipo de briquete analisado (27). Borowski e Ozyuguran et al também utilizaram a metodologia proposta por Magdziarz et al, diferenciando-se apenas pelo número de quedas, que foi de três e uma, respectivamente (28, 29). Já Mousa et al realizou ensaios com quedas sucessivas a partir de 1 m de altura sobre superfície de aço, até que ocorresse a perda de mais de 50% da massa do maior fragmento ou até o limite de cinquenta quedas, critério posteriormente adotado em trabalhos subsequentes (30).

3.7.2 *Teste de Tamboreamento*

O ensaio de tamboreamento consiste em submeter uma massa previamente definida de briquetes a um tambor rotativo, operando a velocidade e tempo constantes, de forma a reproduzir as condições de abrasão e impacto típicas do manuseio industrial. Normas internacionais são frequentemente utilizadas como referência para esse tipo de ensaio, destacando-se a SS-ISO 3271:2007, aplicada a cargas metálicas para alto-forno, e a JIS K2151, voltada à avaliação de materiais sólidos carbonáceos (31, 32). Entretanto, conforme destacado por Silva, a aplicação direta dessas normas em escala laboratorial apresenta limitações, principalmente em função da elevada quantidade de material requerida para a execução dos ensaios padronizados (33). Como alternativa, têm sido propostas adaptações do método, empregando tambores de menores dimensões e massas reduzidas de amostras, o que possibilita a obtenção de resultados representativos e comparáveis às condições industriais. Dessa forma, o ensaio de tamboreamento fornece parâmetros associados à resistência à abrasão dos briquetes, propriedade fundamental frente aos esforços mecânicos recorrentes durante as etapas de transporte, descarga e alimentação dos processos industriais.

3.7.3 *Teste de Compressão*

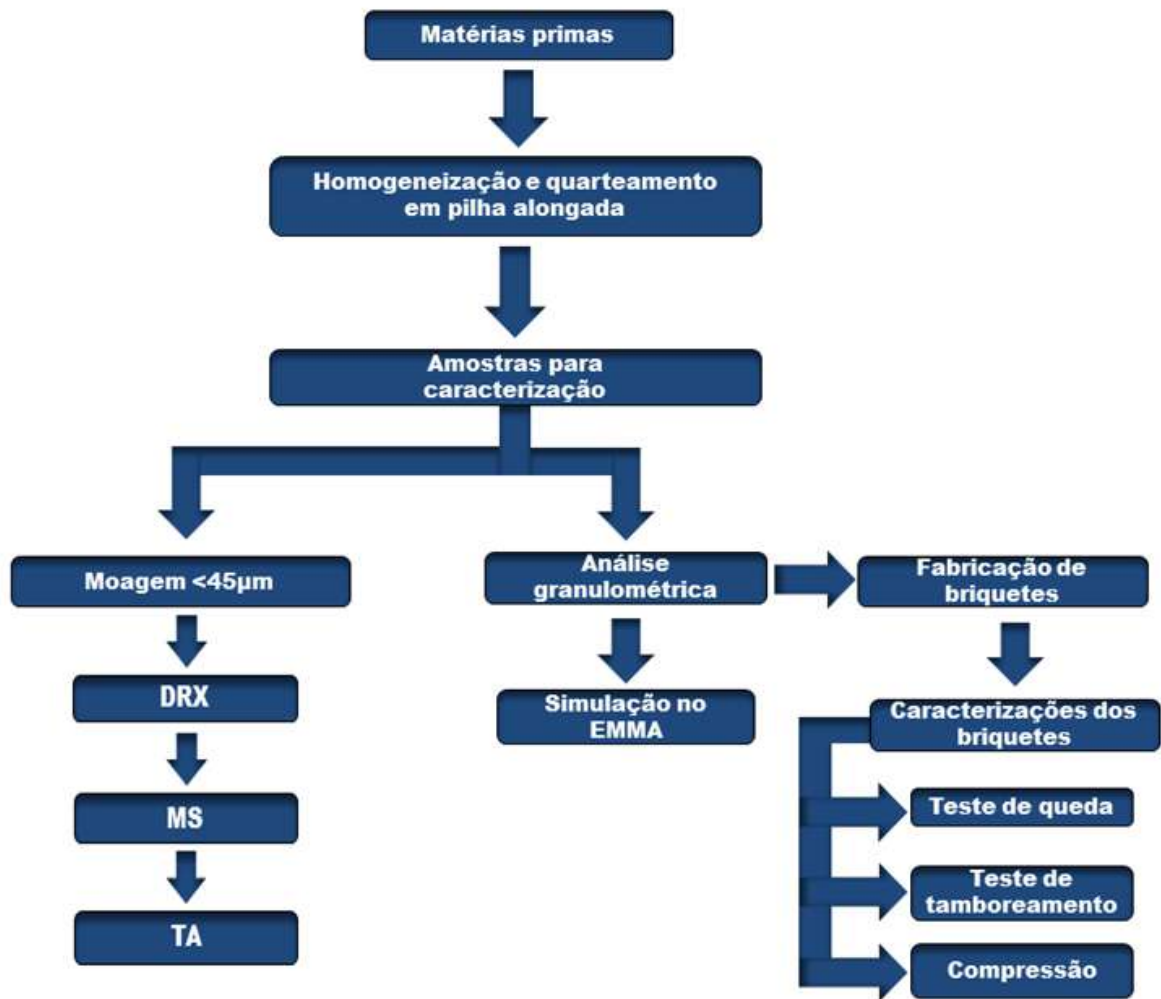
O ensaio de compressão avalia a resistência do briquete à fratura sob carregamento uniaxial progressivo à temperatura ambiente. Um aspecto fundamental desse ensaio é a geometria do corpo de prova, a qual influencia diretamente o estado de tensões desenvolvido durante o

carregamento e o modo de ruptura do material. Para corpos de prova cilíndricos, as normas ABNT NBR 5738 e ABNT NBR 7222 recomendam uma relação de 1:2 entre altura e diâmetro, de modo a garantir condições adequadas de deformação e resultados representativos (34, 35). Entretanto, devido à grande variedade de formatos empregados na produção de briquetes, tais como cilíndricos, prismáticos, em sela, travesseiro ou disco, a comparação direta entre resultados provenientes de diferentes estudos torna-se limitada. Mousa et al, por exemplo, utilizou briquetes de geometria prismática (30), enquanto Magdziarz e Borowski et al avaliaram briquetes com formatos irregulares (26, 28), e Tanaka et al conduziu ensaios utilizando corpos de prova em formato de disco (27). Essa diversidade geométrica, aliada às variações nos parâmetros de prensagem e na composição das misturas, dificulta a padronização dos resultados de resistência à compressão obtidos na literatura.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os procedimentos aplicados para preparação e caracterizações das amostras, além da metodologia utilizada para a avaliação do efeito da mineralogia e da granulometria na qualidade dos briquetes de minério de ferro, conforme fluxograma apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma do processo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 Matéria-prima

As etapas de preparação das amostras foram conduzidas no Laboratório de Siderurgia do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus do Pici. A Tabela 1 apresenta um resumo das amostras de minério de ferro

empregadas neste estudo.

Tabela 1 – Sumário de amostras utilizadas para caracterizações e produção de briquetes.

MINÉRIO DE FERRO	
Granulometria	Origem
Sinter feed	Nordeste
Sinter lavado	Nordeste
Pellet feed	Sudeste

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Aglomerante

O material aglomerante utilizado neste trabalho foi o silicato de sódio, fornecido pela empresa Dinâmica Química. Este composto é amplamente empregado em processos industriais e em pesquisas científicas devido às suas propriedades adesivas, estabilidade química e elevada pureza.

O silicato de sódio atua como aglutinante inorgânico, formando uma matriz vítrea capaz de envolver e ligar as partículas finas, conferindo coesão e resistência mecânica aos briquetes após o processo de secagem ou cura térmica. Essa característica o torna um dos principais agentes de aglomeração utilizados em sistemas que envolvem materiais particulados, como finos de carvão, minério de ferro e resíduos metalúrgicos (36) (37).

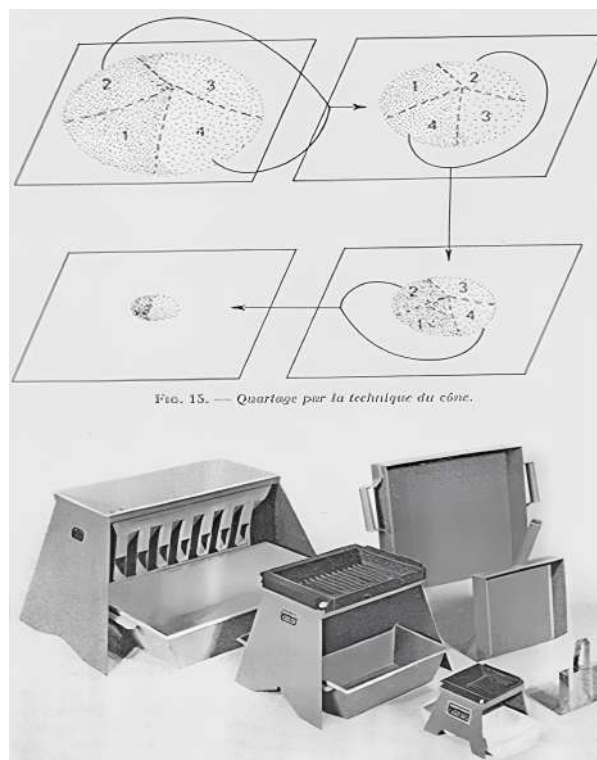
Além disso, o silicato de sódio apresenta elevada estabilidade térmica e resistência a choques térmicos, sendo particularmente vantajoso em aplicações que requerem a manutenção da integridade física do aglomerado em temperaturas elevadas. Na literatura, é frequentemente adotado como material de referência em estudos comparativos de briquetagem, devido à sua capacidade de produzir briquetes com boa resistência à compressão, baixa geração de finos e reprodutibilidade dos resultados (38) (39).

4.3 Análise da Granulometria

4.3.1 Homogeneização e Quarteamento

O quarteamento consiste no processo de redução de uma amostra em porções menores e representativas da amostra original, podendo ser realizado por métodos manuais ou mecânicos. No quarteamento manual, a amostra é inicialmente disposta sobre uma superfície limpa, formando um monte em formato cônico; em seguida, com o auxílio de uma espátula, aplica-se pressão no vértice do cone para a obtenção de um cone truncado, o qual é então dividido em partes iguais, geralmente em quatro, oito ou outro número par. Posteriormente, procede-se à retirada alternada dessas frações (uma sim, uma não), promovendo-se a mistura das porções remanescentes e a repetição do procedimento até que se alcance a massa desejada. Ressalta-se que, previamente à realização do quarteamento, é fundamental que a amostra seja devidamente homogeneizada, a fim de garantir a representatividade do material analisado, conforme Figura 8

Figura 8 – Exemplo de quarteamento e quarteadores.



Fonte: Brisola et al (40)

4.3.2 *Análise Granulométrica*

Neste trabalho, as amostras de minério de ferro foram submetidas a análise granulométrica utilizando-se a norma ABNT NBR ISO 4701. O procedimento consistiu inicialmente com a preparação da amostra por quarteamento sucessivo, de modo a garantir a representatividade do material. A amostra é então seca em estufa a uma temperatura controlada (geralmente entre 105 °C e 110 °C) até atingir massa constante, garantindo a eliminação da umidade superficial sem alterar a estrutura das partículas. Essa etapa é fundamental para que o peneiramento a seco reflita com precisão o tamanho real das partículas, evitando a formação de agregados devido à umidade residual.

Em seguida, realizou-se o peneiramento a seco utilizando um conjunto de peneiras com aberturas em ordem decrescente (por exemplo: 6,3 mm; 3 mm; 1 mm; 0,6 mm; 0,3 mm; 0,15 mm; 0,075 mm; e 0,045 mm), empregando-se um agitador eletromagnético para assegurar a eficiência do processo de separação das frações granulométricas Figura 9.

Figura 9 – Conjunto de peneiras de diversas aberturas fixadas a um agitador eletromagnético.



Fonte: Elaborado pelo autor

O tempo de agitação é determinado de modo a garantir que o material se distribua adequadamente nas peneiras e que as partículas passem pelas aberturas compatíveis com seu tamanho. A norma NBR ISO 4701 recomenda que o tempo seja suficiente para que a massa

retida em cada peneira não varie mais que 1% entre duas pesagens consecutivas, indicando que a separação está completa.

Após o peneiramento, o material retido em cada peneira e no fundo é pesado com precisão analítica, e os resultados são expressos como percentual em massa de cada fração granulométrica. Esses valores permitem construir a curva de distribuição granulométrica, representando o percentual passante acumulado em função da abertura das peneiras. Essa curva é fundamental para determinar parâmetros como o diâmetro médio (d_{50}), o coeficiente de uniformidade (Cu) e a razão de classificação, indicadores importantes da qualidade e da homogeneidade do minério.

4.3.3 *Elkem Materials Mixture Analyzer (EMMA)*

A adequação da distribuição granulométrica das amostras à curva teórica de máximo empacotamento foi avaliada com base no modelo de Andreassen modificado, utilizando o software EMMA (Elkem Materials Mix Analyzer). Foram analisadas cinco amostras constituídas por diferentes proporções de minérios. Inicialmente, os materiais constituintes foram caracterizados quanto à sua distribuição granulométrica, de modo a obter as curvas individuais necessárias para a composição das amostras estudadas.

As distribuições granulométricas das cinco amostras foram obtidas a partir da combinação das curvas individuais dos minérios, respeitando-se a fração mássica de cada material na composição final. Essas distribuições foram então inseridas no software EMMA, que permite a comparação entre a curva experimental da mistura e a curva teórica de empacotamento máximo prevista pelo modelo adotado.

O modelo de Andreassen modificado descreve a distribuição granulométrica ideal para máximo empacotamento de partículas, sendo expresso pela Equação 4.1:

$$P(D) = \frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \quad (4.1)$$

em que $P(D)$ representa a fração acumulada passante para um determinado diâmetro de partícula D , D_{\min} é o diâmetro mínimo das partículas, D_{\max} é o diâmetro máximo das partículas e q é o coeficiente de distribuição granulométrica, relacionado à densidade de empacotamento do sistema.

Neste trabalho, o coeficiente de distribuição q foi fixado em 0,28, valor selecionado

com base na literatura especializada, por ser representativo de sistemas granulares com ampla faixa de tamanhos de partículas e adequado à obtenção de elevado grau de empacotamento. O diâmetro máximo das partículas (D_{\max}) foi mantido constante em 6,3 mm para todas as amostras analisadas e o diâmetro mínimo das partículas (D_{\min}) igual a 1 μm .

A análise dos resultados foi realizada por meio da comparação entre as curvas granulométricas das amostras e a curva teórica gerada pelo EMMA, avaliando-se os desvios ao longo da faixa granulométrica considerada. Esse procedimento possibilitou identificar as amostras com melhor adequação ao empacotamento máximo teórico, bem como compreender o efeito da variação do diâmetro mínimo de partícula sobre o comportamento granulométrico das misturas estudadas.

4.4 Análise Mineralógica

4.4.1 Difração de Raios-X (DRX)

A Difração de Raios-X (DRX) é uma técnica essencial para se obter informações cristalográficas sobre os materiais. Nesse trabalho, utilizou-se um instrumento da marca PANalytical (X'pert Pro MPD) com tubo de cobalto ($K\alpha_1 = 1,789 \text{ \AA}$), varredura de 10-100°, ao passo de 0,13 ° θ /min. As fases esperadas baseado na literatura são divididas em fases ricas em ferro, como Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO, FeO(OH), ferritas de ferro, e fases não ferrosas como outros óxidos metálicos e sais inorgânicos. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Raio-X do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará.

4.4.2 Espectroscopia Mössbauer (MS)

A Espectroscopia Mössbauer (MS) é uma técnica extremamente útil na caracterização de compostos contendo o elemento químico ferro, podendo ser extraídas informações relevantes sobre o ambiente químico do composto analisado. Através dela, busca-se a máxima superposição das linhas de absorção e emissão, sendo obtida imprimindo-se à fonte radioativa uma velocidade relativa ao absorvedor, levando a uma modulação da energia dos raios gama (g), sendo a condição de ressonância entre a fonte e a amostra obtida pelo efeito Doppler. Assim, para esse documento de dissertação, realizou-se medidas no modo de transmissão, com fonte radioativa de ^{57}Co , energia de 14,4 keV e equipamento previamente calibrado usando o padrão $\alpha\text{-Fe}$. Os parâmetros hiperfinos para os minérios de ferro foram obtidos através do software NORMOS-

90 Mössbauer Fitting Package Program, fazendo uso de uma rotina de ajuste (algoritmo) por mínimos quadrados e curvas Lorentzianas. Os ensaios ocorreram no Laboratório de Materiais Avançados do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará.

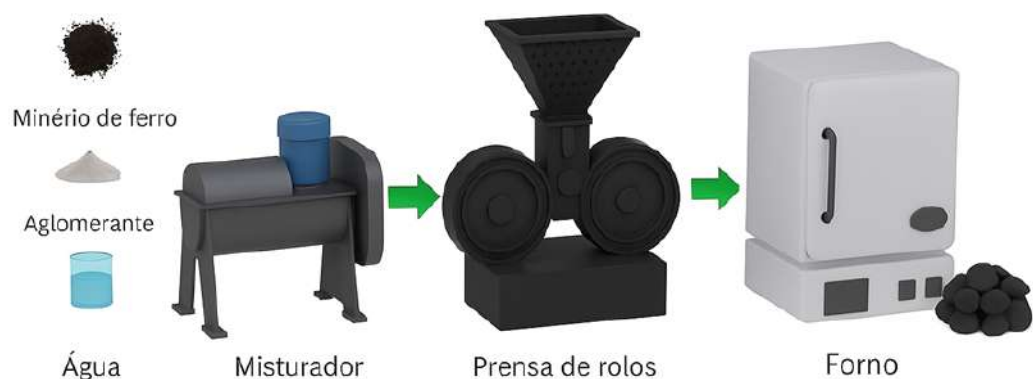
4.4.3 Análise Termogravimétrica (TA)

A análise termogravimétrica (TA) é aplicada com o intuito de avaliar a estabilidade térmica do material, a presença de umidade e de compostos voláteis em função do tempo e temperatura, sob uma atmosfera controlada. Nesse trabalho, utilizou-se um instrumento da marca NETZSCH STA 449F3 e condições de análise em atmosfera de ar sintético, varredura de 25-800°C e taxa de aquecimento de $5 \text{ C} \cdot \text{min}^{-1}$ para obtenção das curvas de mudança de massa (decomposição térmica) por Análise Termogravimetria (TGA) e variação de energia por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC). Dessa forma, nessa análise foram utilizadas 100 mg de amostra inseridas em um cadinho de alumina. Os ensaios ocorreram no Laboratório de Materiais Avançados do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará.

4.5 Fabricação de Briquetes

Neste trabalho o fluxo de produção dos briquetes é ilustrado na figura 10.

Figura 10 – Processo de fabricação de briquetes com tratamento térmico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A primeira etapa consiste na adição de minério de ferro, ligante e água no misturador

para ocorrer a homogeneização do material. Após a mistura está visivelmente homogênea, a carga é transferida e alimentada no funil da briquetadeira de rolos, na qual é realizado a compressão dos briquetes. Os briquetes íntegros são separados em uma bandeja, pesados e direcionados para o forno e submetidos a um ciclo térmico de cura dependendo do tipo de ligante utilizado. Após esta etapa, os briquetes são resfriados e testados quanto à resistência a queda, compressão, tamboreamento e umidade.

A fabricação dos briquetes foi realizada no Laboratório de Siderurgia do departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará.

4.6 Avaliação da qualidade dos briquetes

Os briquetes fabricados conforme mostrado pela Figura 11, foram submetidos a testes a frio com o objetivo de investigar suas principais propriedades como resistência ao impacto, abrasão e a compressão, seguindo as normas internacionais.

Figura 11 – Imagens de briquetes produzidos a partir de minérios de ferro de diferentes regiões: imagem a esquerda briquete (Sudeste) - (preto) e a imagem a direita briquete do (Nordeste) - (marrom).



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6.1 Teste de Queda

O shatter test tem procedimento estabelecido pela norma JIS M 8711 (Iron ore sinter-Determination of shatter strength) (41). O objetivo desse ensaio é medir a susceptibilidade do material a degradação e geração de finos pelo efeito de quedas sucessivas.

Neste trabalho, os ensaios shatter foram adaptados segundo a norma JIS M 8711 para qualificar a resistência dos briquetes em relação ao impacto (41). Desta forma, amostras de 1 kg de briquetes são submetidas a 5 quedas consecutivas de uma altura de 2 metros, sob um aparato metálico com dimensões de 1 m x 1 m e 25 cm de altura. Ao final do teste, as amostras de briquetes ensaiadas são peneiradas em malhas 9,5 mm. O índice shatter é determinado pelo percentual em massa da fração retida de 9,5 mm, em relação à massa total de amostra ensaiada.

De acordo com a norma em altos-fornos a coque das usinas brasileiras, índices acima de 90% são considerados ótimos.

4.6.2 Teste de Tamboreamento

Os ensaios de tamboreamento foram realizados adaptados segundo a norma ISO 3271 (42). Desta maneira, o ensaio consiste em selecionar 1,5 kg de briquetes, submetendo a amostra a 200 rotações a uma frequência de 25 RPM, em um tambor de 500 mm de diâmetro e 250 mm de largura. O tambor possui internamente duas aletas diametralmente opostas para garantir a correta movimentação dos briquetes dentro do tambor, forçando a sua queda durante cada rotação. Ao final do teste, as amostras de briquetes ensaiadas são peneiradas em malhas 9,5 mm. O índice de tamboreamento é determinado pelo percentual em massa da fração retida de 9,5 mm, em relação à massa total de amostra ensaiada.

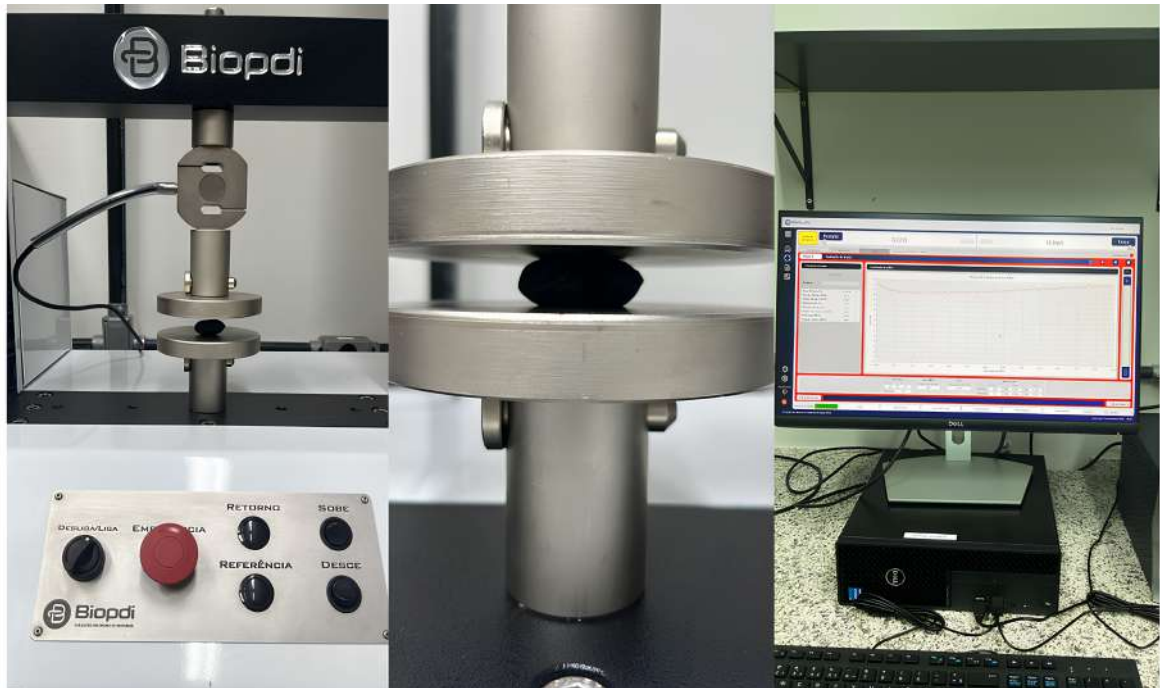
4.6.3 Teste de Compressão

Os ensaios de compressão simples foram realizados em um equipamento EMIC com corpos de prova alinhados longitudinalmente ao eixo de aplicação da força e velocidade de compressão constante e igual 1mm/min. O parâmetro avaliado será tensão no momento da ruptura do corpo de prova, que é calculado como a força máxima obtida no ensaio dividido pela área da seção transversal inicial da amostra. Foram ensaiados 5 briquetes por condição de ensaio.

Os testes de compressão foram realizados nas amostras após a fase de tratamento térmico. Foi utilizado o Laboratório de Ensaio Mecânicos da EMBRAPA para a realização dos

ensaios de compressão, conforme demonstrado na Figura 12.

Figura 12 – Teste de compressão uniaxial de briquetes utilizando aplicação da força e velocidade de compressão constante igual a 1mm/min.



Fonte: Elaborado pelo autor

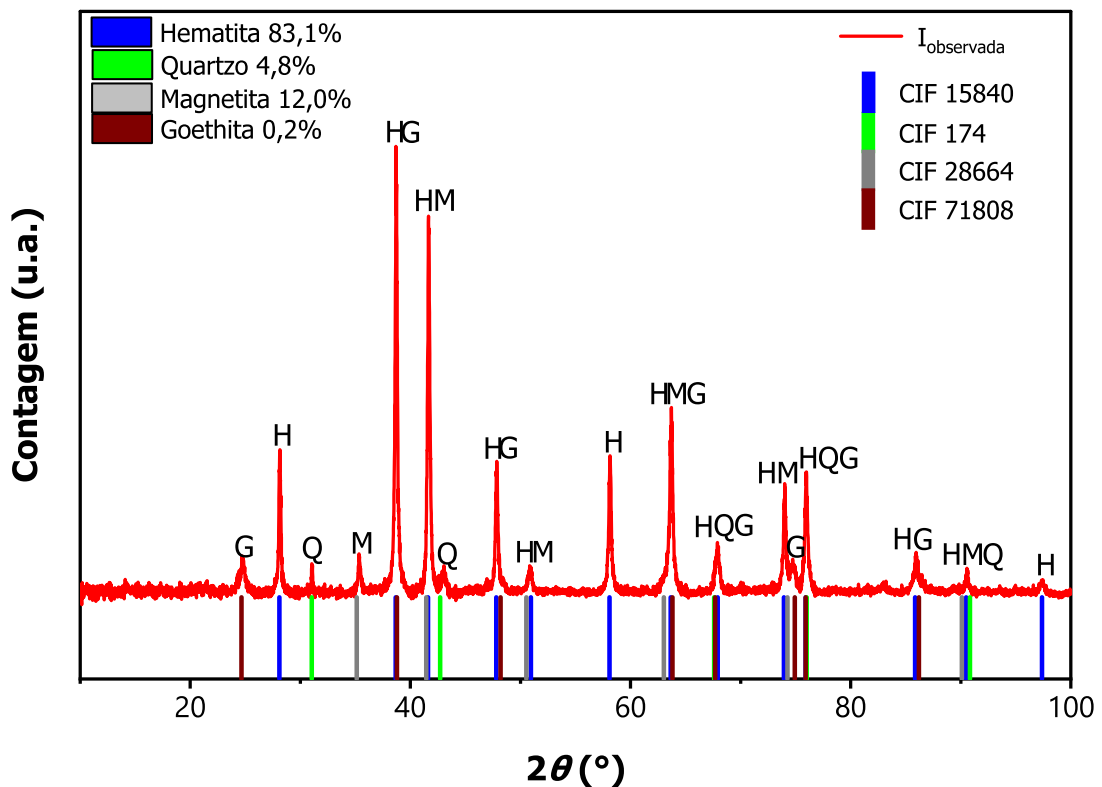
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Difração de Raios-X (DRX)

A análise da DRX possibilitou a identificação das fases cristalinas presentes na amostra a partir da correspondência entre os picos de difração experimentais e os padrões cristalográficos descritos na literatura.

A partir do difratograma apresentado na Figura 13, observa-se que as posições dos picos de difração da amostra de minério de ferro proveniente da região do nordeste apresentam excelente concordância com os padrões cristalográficos indexados (CIF 15840, CIF 174, CIF 28664 e CIF 71808), obtidos na base Inorganic Crystal Structure Database (ICSD).

Figura 13 – Difratograma da amostra de minério de ferro do nordeste.



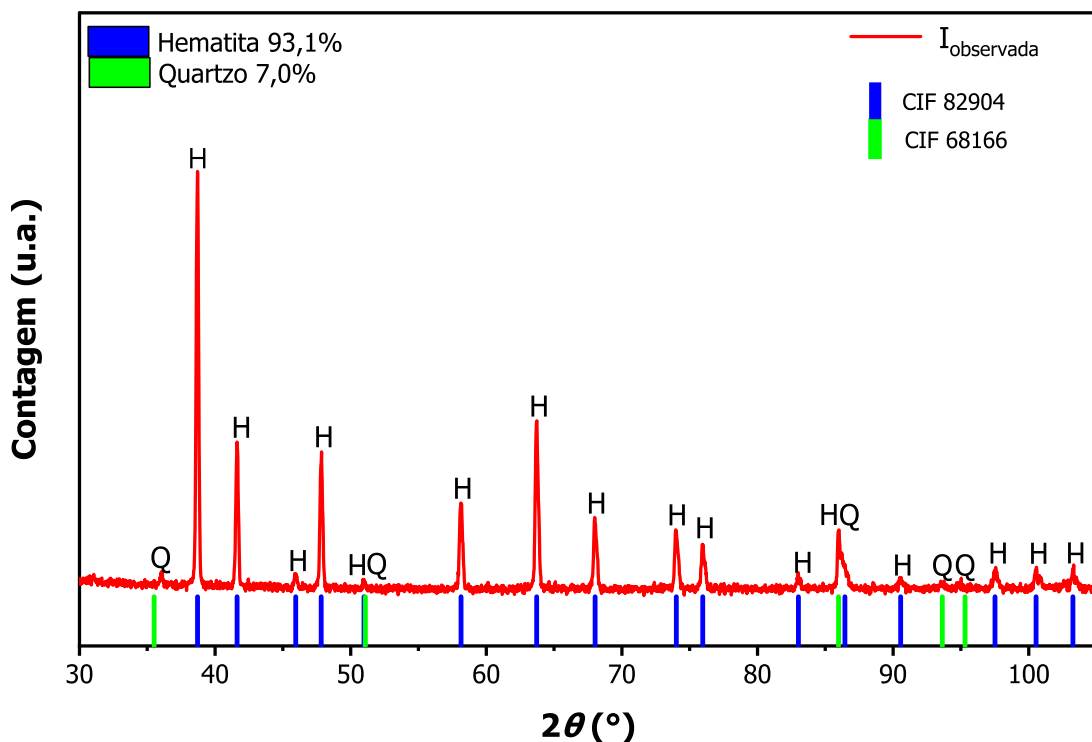
Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa correspondência confirma a presença de múltiplas fases minerais no material, como a hematita, caracterizada por estrutura romboédrica e grupo espacial R-3c; quartzo, com estrutura hexagonal e grupo espacial P3221; magnetita, de estrutura cúbica pertencente ao grupo espacial Fd-3m; e goethita, cuja estrutura ortorrômbica é descrita pelo grupo espacial Pbnm.

Esses resultados reforçam a heterogeneidade mineralógica da amostra e a consistência das identificações fornecidas pela análise de difração de raios-X.

Já no difratograma apresentado na Figura 14, observa-se que as posições dos picos de difração da amostra de minério de ferro do sudeste apresentam excelente concordância com os padrões cristalográficos indexados (CIF 82904 e CIF 68166). Essa correspondência indica que o minério possui caráter predominantemente hematítico, conforme padrões obtidos na base de dados ICSD.

Figura 14 – Difratograma da amostra de minério de ferro do sudeste



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.1 Análise de Rietveld

Para a análise semiquantitativa das fases cristalográficas presentes nas respectivas amostras de minério de ferro, foi utilizado o programa X'Pert HighScore Plus da Panalytical®, o qual permite que o método de Rietveld seja feito de forma automática (com parâmetros determinados), semi-automático ou manual (ajuste para cada parâmetro) utilizando-se padrões de difração das fases cristalográficas obtidas na base ICSD e as respectivas posições dos átomos da estrutura cristalina das fases, conforme pode ser observado na Figura 15 e Figura 16. Tendo em vista, que o método de Rietveld consiste no processo em que se realiza ajustes de parâmetros

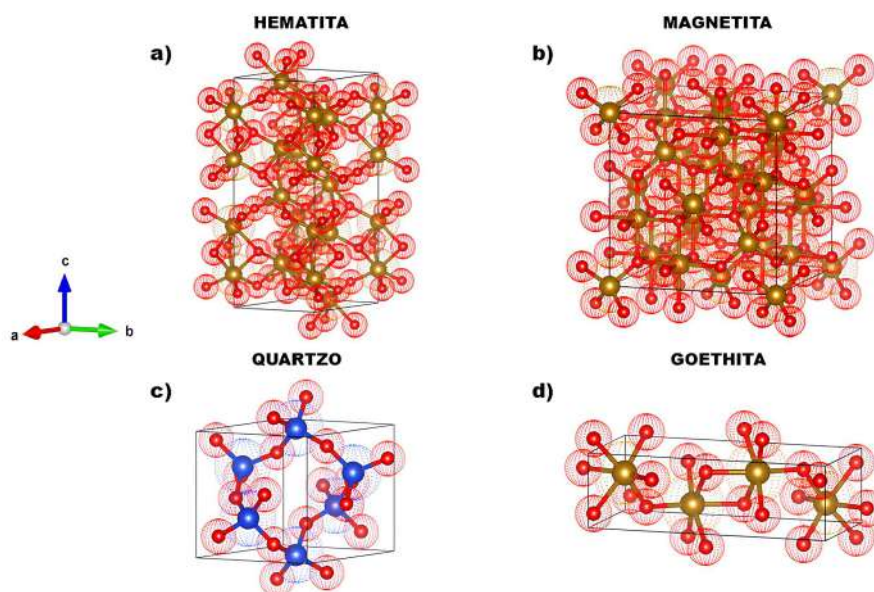
baseados em um padrões de difrações que seja o mais próximo do observado. Desta maneira, o método define as equações que irão calcular as intensidades e formas dos picos de uma curva teórica, a fim de se obter o ajuste com dados experimentais. Os parâmetros são refinados iterativamente, através de um processo cuja convergência resulta no ajuste da curva teórica, segundo estudo feito por Paiva Santos et al (43). As diferenças entre as intensidades encontradas em cada ponto são ajustadas pelo método dos mínimos quadrados. O método tem sido aprimorado e utilizado no refinamento de estruturas cristalinas de materiais e quantificação de fases de misturas minerais (43), conforme evidenciado na Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2 – Análise semiquantitativa da amostra de minério de ferro do nordeste.

Fases Minerais	Porcentagem das fases (%)	Estrutura cristalina/Grupo Espacial
Hematita (Fe_2O_3)	79,8	Romboédrico/R-3c
Magnetita (Fe_3O_4)	12,0	Cúbico/Fd-3m
Goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$)	3,4	Ortorrômico/Pbnm
Quartzo (SiO_2)	4,8	Hexagonal/P3221

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 – Estruturas cristalinas das fases presentes no minério de ferro do nordeste.



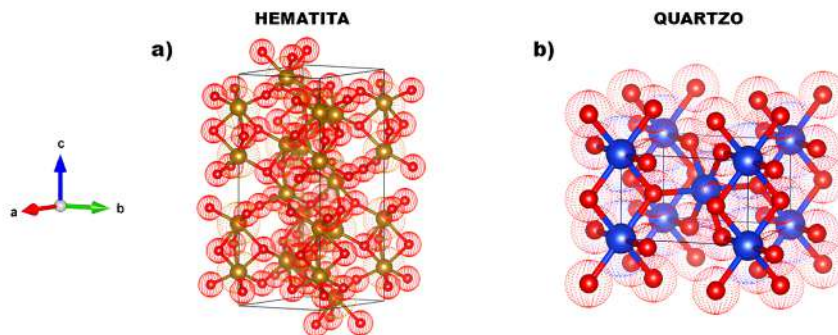
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Análise semiquantitativa da amostra de minério de ferro da região do sudeste.

Fases Minerais	Porcentagem das fases (%)	Estrutura cristalina/Grupo Espacial
Hematita (Fe_2O_3)	93,0	Romboédrico/R-3c
Quartzo (SiO_2)	7,0	Tetragonal/P42/mnm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – Estruturas cristalinas das fases presentes no minério de ferro do sudeste.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Espectroscopia Mössbauer (MS)

As medidas de MS foram realizadas à temperatura ambiente em um espectrômetro SEECO, Modelo W302, utilizando uma fonte de cobalto-57, em uma matriz de ródio. Os dados foram ajustados usando o software NORMOS, empregando o método de sítios. As amostras que apresentaram dubletos e sextetos foram analisadas utilizando velocidade Doppler de 12 mm/s.

O espectro Mössbauer da amostra de minério de ferro do nordeste apresenta quatro subespectros, sendo três sextetos magneticamente ordenados e um dubleto, indicando uma mineralogia mais complexa e heterogênea.

O primeiro sexteto exibe parâmetros hiperfinos típicos da hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), com valores elevados de campo hiperfino magnético ($B_{hf} \approx 51\text{--}53\text{ T}$), deslocamento isomérico ($\delta \approx 0,36\text{--}0,38\text{ mm/s}$) característico de Fe^{3+} em coordenação octaédrica, e pequeno desdobramento quadrupolar (Δ negativo e de baixa magnitude), conforme Tabela 4. Esses valores estão em excelente concordância com os dados de referência para hematita bem cristalizada à temperatura ambiente indicada na Tabela 5 (23).

Os dois sextetos adicionais são atribuídos à magnetita (Fe_3O_4), correspondendo aos sítios tetraédricos (A) e octaédricos (B) da estrutura espinélio inversa. Conforme descrito na literatura, o sexteto associado ao sítio A apresenta menor deslocamento isomérico, típico de Fe^{3+} tetraédrico, enquanto o sexteto do sítio B apresenta valores mais elevados de δ , associados à valência média $\text{Fe}^{2.5+}$, resultante da rápida troca eletrônica entre Fe^{2+} e Fe^{3+} à temperatura ambiente. A presença simultânea desses dois sextetos indica magnetita estruturalmente bem definida e magneticamente ordenada, o que sugere condições favoráveis à preservação ou formação dessa fase (23).

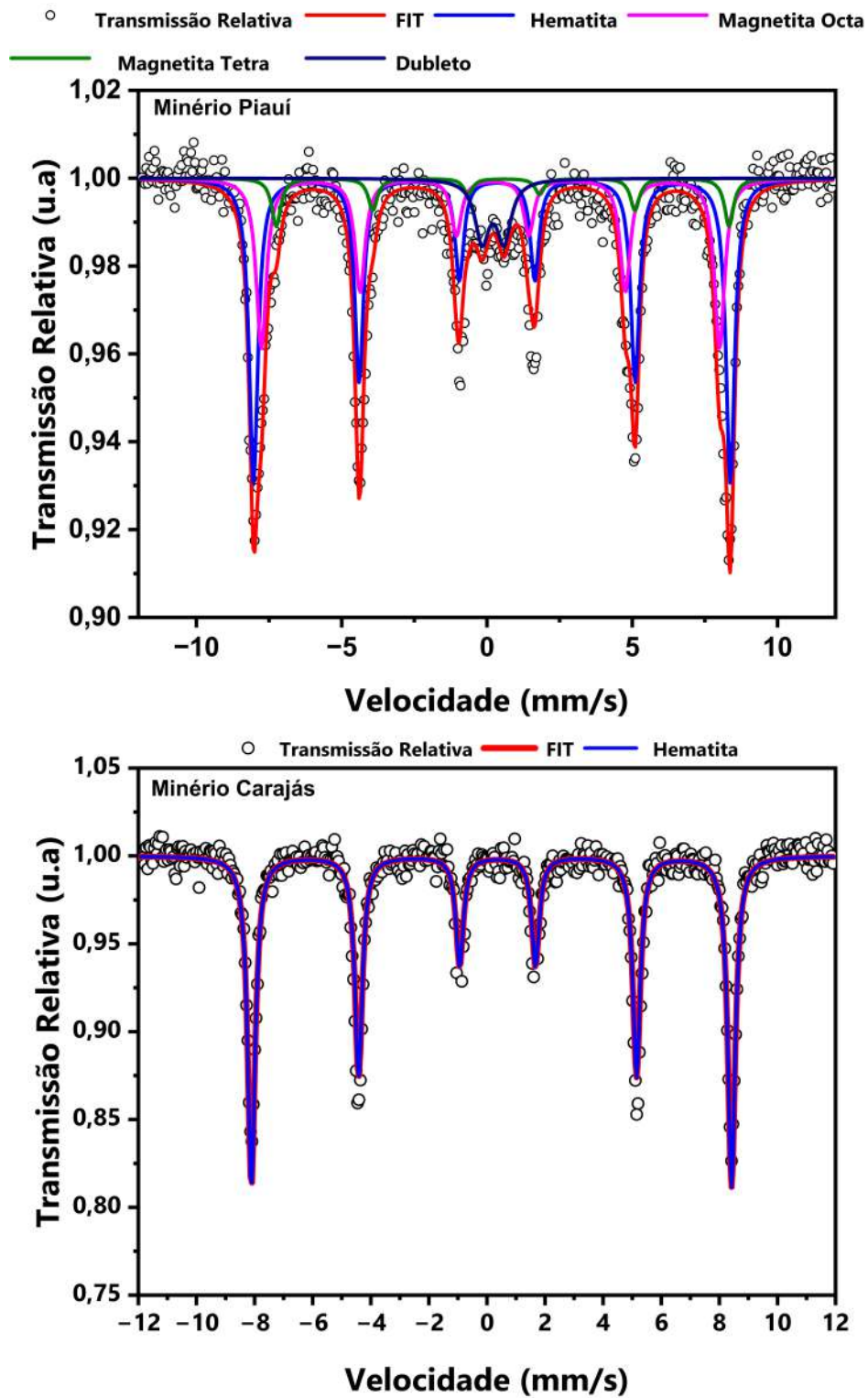
O quarto subespectro, representado por um dubleto, apresenta parâmetros característicos de Fe^{3+} em coordenação octaédrica, com deslocamento isomérico típico e ausência de campo hiperfino magnético resolvido. Esse comportamento é consistente com fases paramagnéticas ou superparamagnéticas, podendo estar associado a óxidos de ferro mal cristalizados, como ferrihidrita, hematita nanocristalina ou regiões superficialmente desordenadas das fases magnéticas. De acordo com a literatura, esse efeito pode estar relacionado ao tamanho reduzido das partículas, que promove relaxação superparamagnética à temperatura de medida (23).

De forma integrada, a coexistência de hematita, magnetita e um componente paramagnético sugere que a amostra do nordeste passou por processos que favoreceram heterogeneidade mineralógica, possivelmente associados a transformações redox, variações térmicas ou etapas de beneficiamento.

Em contraste, o espectro Mössbauer da amostra de minério do sudeste é composto por um único sexteto, cujos parâmetros hiperfinos são típicos de hematita. Os valores de B_{hf} , δ e Δ evidenciados na Tabela 4 estão de acordo com aqueles reportados para hematita bem cristalizada e magneticamente estável à temperatura ambiente indicada pela Tabela 5 (23).

A ausência de sextetos associados à magnetita ou de componentes paramagnéticas indica que o minério do sudeste apresenta elevado grau de oxidação, alta homogeneidade mineralógica e boa cristalinidade, sem evidências de fases ferromagnéticas mistas ou partículas ultrafinas com comportamento superparamagnético. Esse resultado é compatível com minérios hematíticos de alto grau, amplamente descritos na literatura para depósitos brasileiros.

Figura 17 – Espectroscopia Mössbauer com minérios de ferro de diferentes regiões



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Parâmetros hiperfinos obtidos a partir dos espectros Mössbauer para as amostras de minérios de ferro.

	Minério Nordeste				Minério Sudeste			
	δ (mm/s)	Δ (mm/s)	B_{hf} (T)	área (%)	δ (mm/s)	Δ (mm/s)	B_{hf} (T)	área (%)
Dubleto	0,31	0,75	–	8,102	–	–	–	–
Sexteto 1	0,36	-0,18	51,0	50,761	0,37	-0,21	51,2	100
Sexteto 2	0,26	-0,07	49,0	32,917	–	–	–	–
Sexteto 3	0,67	-0,04	47,5	8,220	–	–	–	–

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela abaixo apresenta os principais parâmetros hiperfinos obtidos por espectroscopia Mössbauer para óxidos de ferro naturalmente ocorrentes contendo Fe^{3+} (23).

Tabela 5 – Magnetic properties and Mössbauer parameters of naturally-occurring Fe^{3+} oxides.

Mineral	T_N, T_C (K)	MAG ^a	Room Temperature			4.2 K	
			B_{hf} (T)	δ/Fe	Δ (mm/s)	B_{hf} (T)	Δ (mm/s)
Hematite	955	wfm	51.8	0.37	-0.20	53.5 or 54.2 ^b	-0.20, 0.41
Magnetite	850	fim	49.2	0.26	$\leq 0.02 $	50.6	0.00
			46.1	0.67	$\leq 0.02 $	36–52 ^c	1.18–(-0.79)
Maghemite	~950	fim	50.0	0.23	$\leq 0.02 $	52.0	$\leq 0.02 $
			50.0	0.35	$\leq 0.02 $	53.0	$\leq 0.02 $
Goethite	400	afm	38.0	0.37	-0.26	50.6	-0.25
Akaganeite	299	afm	–	0.38	0.55	47.3	-0.81
			–	0.37	0.95	47.8	-0.24
			–	–	–	48.9	-0.02
Lepidocrocite	77	afm	–	0.37	0.53	45.8	0.02
Feroxyhite	450	fim	41.0	0.37	-0.06	53.0	-0.0
			–	–	–	52.0	-0.0
Ferrihydrite	115 ^d	spm	–	0.35	0.62 ^e	50 ^e	-0.07
	25 ^d		–	0.35	0.78 ^e	47 ^e	-0.02
Bernalite	427	wfm	41.5	0.38	$\leq 0.01 $	56.2	$\leq 0.01 $

5.3 Análise Térmica (TA)

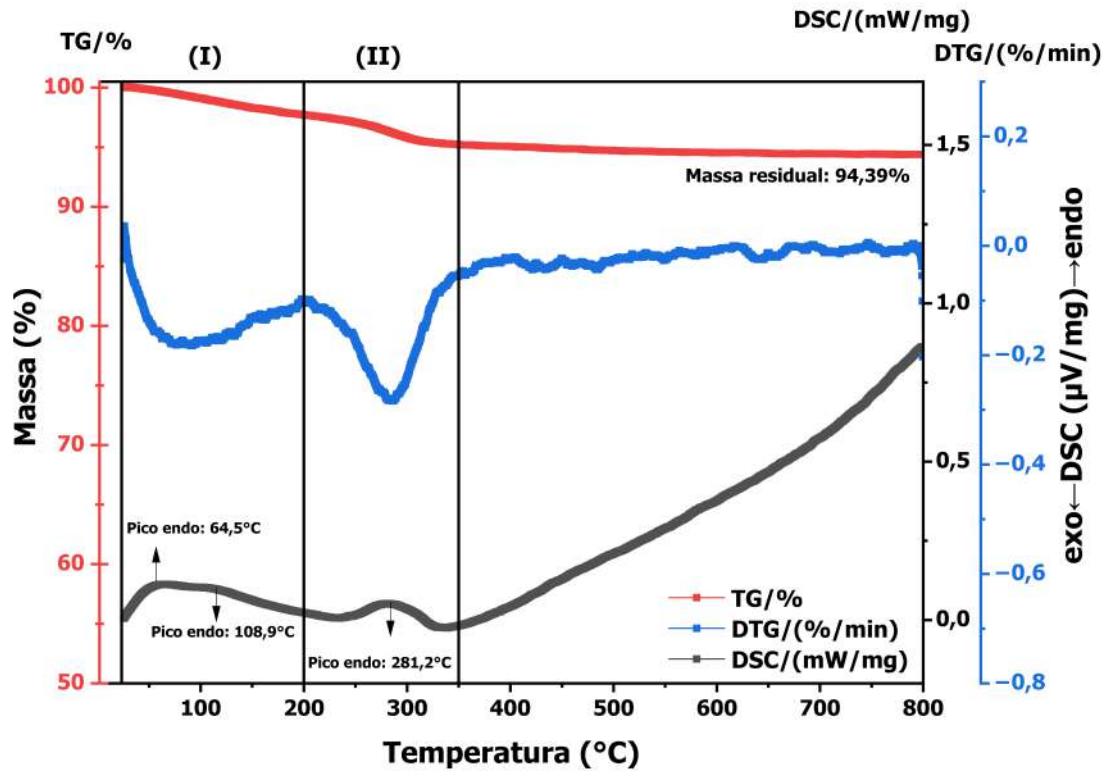
A TA, isto é, as curvas de perda de massa (TGA) e variação de energia de transformação (DSC) por temperatura para a amostra de minério de ferro do nordeste pode ser observada na Figura 18 e é caracterizada por dois principais eventos.

O primeiro (I), observado na curva DSC, ocorre entre 25-200°C e pode ser atribuído a evaporação da água presente no material e a decomposição da matéria volátil residual, correspondendo a uma perda de massa (curva TGA) de aproximadamente 2,43%. Já o segundo evento (II) observado na curva DSC, ocorre na faixa de temperatura de 200-350°C e corresponde à decomposição da goethita ($\text{FeO}(\text{OH})_x$) em $\text{FeO} \cdot (\text{OH})_x \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$, liberando até 2,49% em peso, acompanhado por um pico endotérmico a 281,2°C na curva DTG. Esse pico ocorre devido à reação endotérmica causada pelo calor necessário para ocorrer a decomposição da fase, que depende da quantidade de goethita presente na amostra. A maior quantidade de goethita no minério leva a uma maior absorção de calor para remover a água combinada, o que então gera um pico mais nítido em outra na faixa de temperatura em que a goethita se decompõe. A partir desse estágio, não ocorre mais eventos térmicos no material sendo que somente a partir de 700°C o sistema é estabilizado e o óxido estável é formado, cuja massa residual percentual foi de 94,39%.

Os resultados acima apresentados estão similares a alguns trabalhos reportados pela literatura. Yunus et al. (44), por exemplo, também observou que a análise térmica de minério de ferro exibiu o evento endotérmico da decomposição da goethita, na temperatura de 240-340°C com o pico endotérmico ocorrendo em 273°C pela curva DTA.

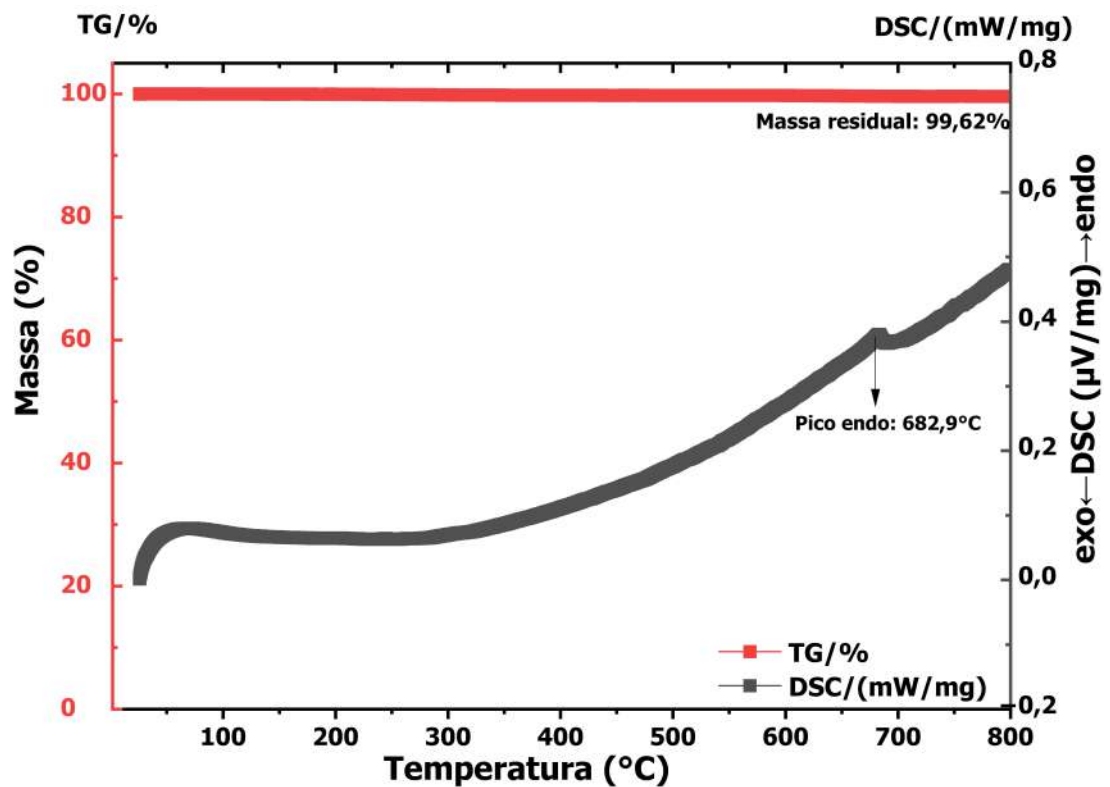
A partir das curvas de TGA/DSC apresentada na Figura 18 é possível sugerir que a partir dos eventos térmicos que o minério da região do nordeste é termicamente menos estável em relação ao minério da região do sudeste, conforme observado na Figura 19, tendo em vista que não se detecta nenhuma variação de massa na curva TGA e nenhuma variação de energia significativa nas curvas de DSC.

Figura 18 – Análise térmica do minério de ferro do nordeste.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 – Análise térmica do minério de ferro do sudeste.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 Análise Granulométrica

Tabela 6 – Distribuição granulométrica passante dos minérios de ferro.

Amostra	Porcentagem passante em peso nas peneiras (mm)						
	6300 μm	3000 μm	600 μm	300 μm	150 μm	75 μm	45 μm
Pellet Feed (Sudeste)	100%	100%	97,95%	96,00%	92,20%	81,05%	37,48%
Minério 0-3 mm (Nordeste)	98,00%	88,06%	59,36%	41,06%	4,61%	1,38%	0,82
Minério 3-6 mm (Nordeste)	90,31%	38,96%	16,87%	13,53%	7,79%	3,65%	2,17%
Sinter (Nordeste)	100%	95,68%	88,80%	43,24%	5,28%	1,55%	0,08%
Sinter Lavado (Nordeste)	100%	97,04%	92,09%	60,58%	9,48%	2,94%	0,21%

Nota: As porcentagens são baseadas na massa seca do agregado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.1 *Elkem Materials Mixture Analyzer (EMMA)*

Para a avaliação da influência da granulometria na qualidade dos briquetes, foram preparadas cinco amostras com diferentes faixas granulométricas, conforme apresentado na Tabela 7. As composições granulométricas de cada amostra foram simuladas no software EMMA, com o objetivo de analisar o fator de empacotamento das partículas.

Os resultados obtidos foram comparados com a curva teórica de Andreassen modificada, representada pela linha vermelha Figura 20, amplamente utilizada para descrever distribuições granulométricas que maximizam o empacotamento de partículas. Considerando que um maior grau de empacotamento reduz a porosidade do material e aumenta a área de contato entre as partículas, espera-se que amostras com maior fator de empacotamento apresentem melhores propriedades mecânicas, como maior resistência à compressão e maior integridade estrutural dos briquetes. Estudos experimentais demonstraram que a distribuição granulométrica e o tamanho das partículas têm efeito significativo nas propriedades físicas e mecânicas de briquetes – por exemplo, a resistência à compressão e o módulo elástico tendem a aumentar

quando as partículas são menores, devido ao melhor empacotamento e maior força de interação entre partículas (45).

Tabela 7 – Distribuição granulométrica e classificação das amostras

Amostra	Pellet Feed (%)	0–3 mm (%)	3–6 mm (%)	Sínter Peneirado (%)	Sínter Lavado (%)
Amostra 1	100	0	0	0	0
Amostra 2	0	100	0	0	0
Amostra 3	0	70	30	0	0
Amostra 4	0	0	0	100	0
Amostra 5	0	0	0	0	100

Nota: Os valores correspondem à fração percentual em massa de cada faixa granulométrica.

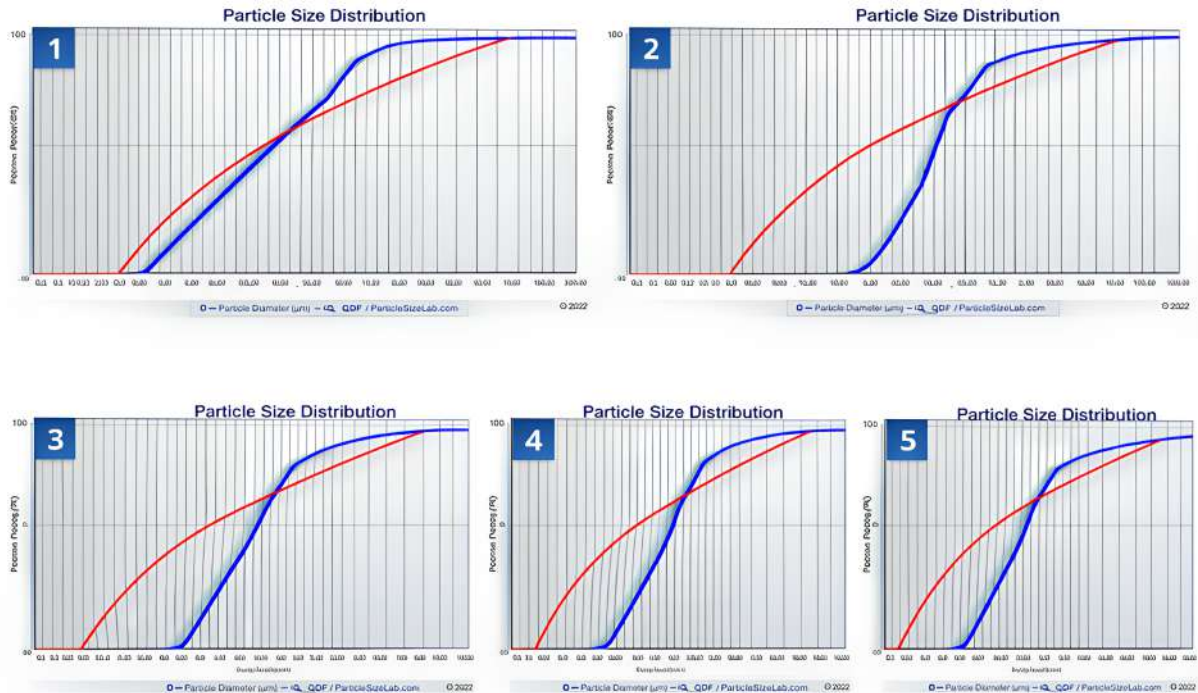
Fonte: Elaborado pelo autor.

Desta forma, a análise das curvas de distribuição granulométrica obtidas por meio do software EMMA, com base no modelo de Andreassen modificado, evidencia que a Amostra 1 - curva granulométrica do pellet feed do sudeste apresentou o melhor fator de empacotamento dentre as cinco amostras avaliadas indicando uma distribuição granulométrica mais próxima da condição ideal de máxima densificação.

O bom ajuste observado na Amostra 1 sugere uma distribuição contínua de tamanhos de partículas, com adequada proporção entre frações grossas, intermediárias e finas, favorecendo o preenchimento eficiente dos vazios entre as partículas maiores pelas partículas de menor tamanho. Esse comportamento resulta em uma estrutura mais compacta, com menor porosidade e maior área de contato interparticular.

Em contraste, as demais amostras apresentam desvios mais pronunciados em relação à curva de Andreassen modificada, especialmente nas faixas granulométricas mais finas da curva, evidenciando uma falta de material fino no material. Essas características tendem a comprometer o empacotamento das partículas, resultando em estruturas menos densas e, conseqüentemente, em desempenho mecânico inferior.

Figura 20 – Análise realizada pelo software EMMA pelo modelo de Andreassen Modificado.



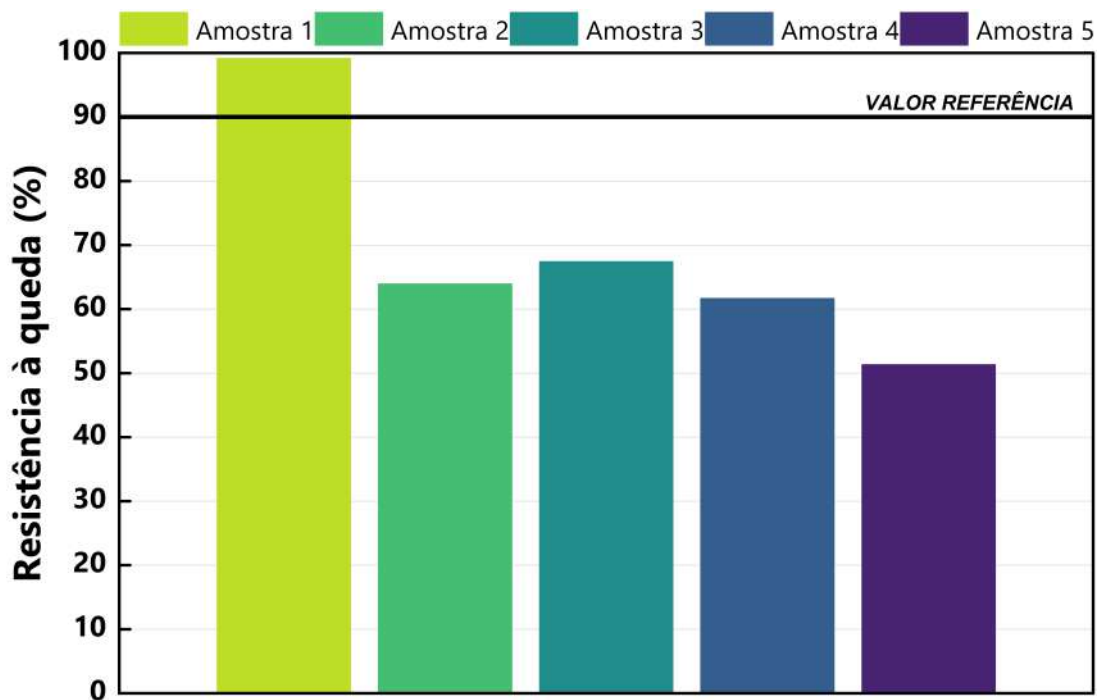
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5 Avaliação da Qualidade dos Briquetes

Após a realização dos ensaios de queda, tamboreamento e compressão, foi possível estabelecer uma correlação direta entre a distribuição granulométrica das amostras e as propriedades mecânicas dos briquetes produzidos. De modo geral, observou-se que amostra 1 obteve o melhor empacotamento das partículas com desempenho mecânico superior nos ensaios a frio, evidenciando a influência da granulometria na integridade estrutural dos briquetes.

A Figura 21 apresenta o resultado do ensaio de resistência à queda, expresso pela porcentagem de material retido acima de 9,5 mm após cinco quedas consecutivas. Nota-se que a amostra 1 apresentou o maior valor de resistência à queda 99,25%, atingindo valores acima do exigido (valor de referência) para aplicação em altos fornos de 90% de finos acima de 9,5 mm, indicando menor geração de finos durante o ensaio. Em contrapartida, as demais amostras apresentaram valores progressivamente inferiores, refletindo maior fragilidade mecânica.

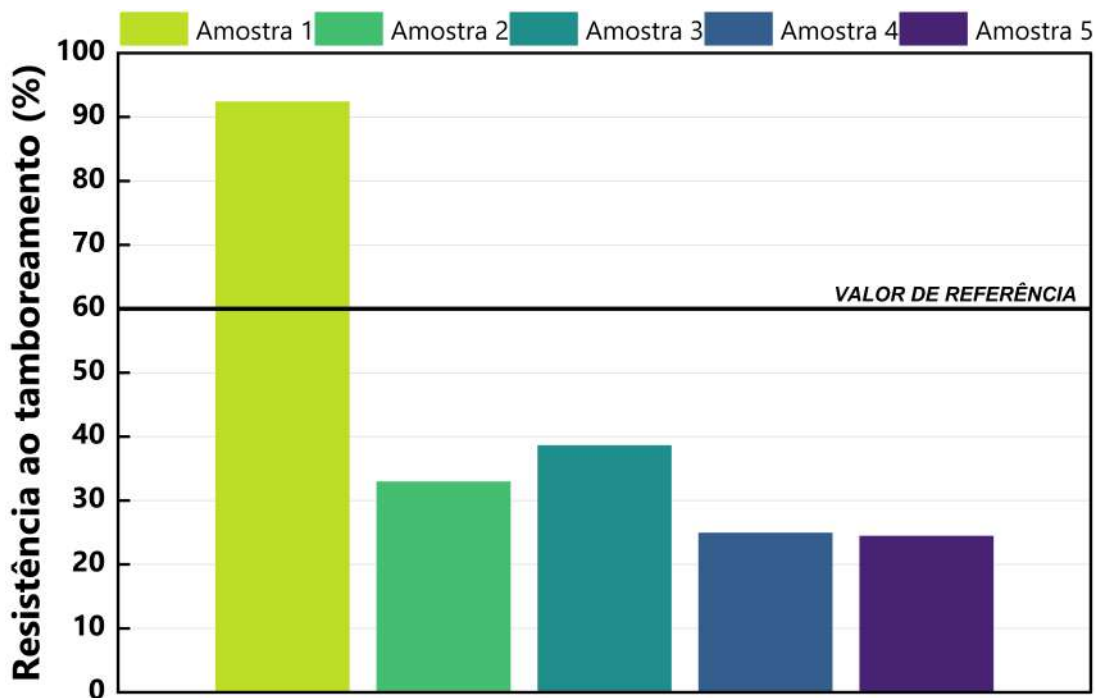
Figura 21 – Resistência à queda medida pela quantidade de material maior que 9,5 mm após submissão de 5 quedas consecutivas do material.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 22 apresenta os resultados do ensaio de resistência ao tamboreamento, expressos pela porcentagem de material retido acima de 9,5 mm após a submissão das amostras a 200 rotações a uma frequência de 25 RPM. Observa-se que a amostra 1 apresentou o maior valor de resistência ao tamboreamento de 92,43%, com desempenho significativamente superior às demais e acima do valor de referência estabelecido para aplicação industrial de 60% acima de 9,5 mm, indicando maior resistência mecânica e menor geração de finos durante o ensaio. Por outro lado, as demais amostras apresentaram valores consideravelmente inferiores, evidenciando maior degradação do material ao longo do processo de tamboreamento.

Figura 22 – Resistência ao tamboreamento medida pela quantidade de material maior que 9,5 mm após submeter a amostra a 200 rotações a uma frequência de 25 RPM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

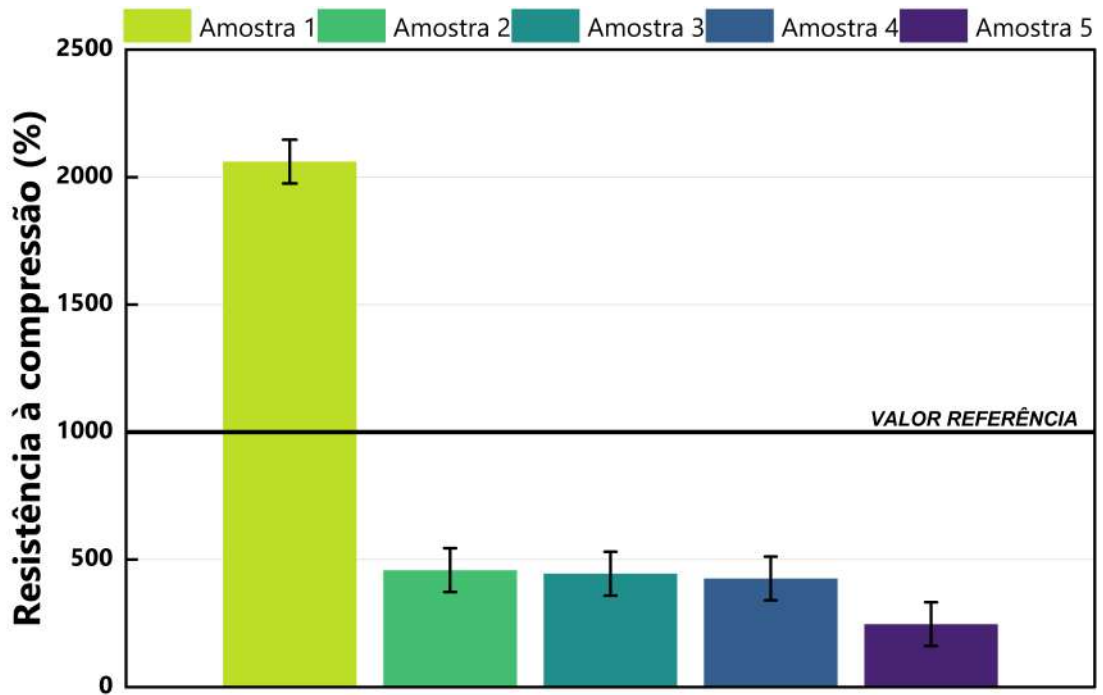
A Figura 23 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão, expressos pela força máxima suportada pelas diferentes amostras. Observa-se que a amostra 1 apresentou o maior valor de resistência à compressão, superando os valores de 2000 N, acima do valor exigido para aplicação em altos fornos de 1000 N, o que indica elevada integridade estrutural e maior capacidade de suportar esforços mecânicos. Em contraste, as amostras apresentaram valores substancialmente inferiores na ordem de 500 N, situando-se abaixo do valor de referência, o que evidencia menor resistência mecânica.

Esse comportamento pode ser atribuído ao melhor empacotamento das partículas na amostra 1, o qual favorece o aumento da área de contato entre os grãos e a redução da porosidade interna do briquete. Um empacotamento mais eficiente contribui para uma distribuição mais homogênea das tensões aplicadas durante os ensaios mecânicos, resultando em maior resistência à compressão, menor degradação no teste de queda e melhor desempenho no ensaio de tamboreamento.

Dessa forma, os resultados obtidos nos ensaios a frio indicam que o fator de empacotamento das partículas exerce papel determinante no comportamento mecânico dos briquetes.

Com base nos resultados apresentados, a amostra 1 se destaca como a mais promissora para aplicação na produção de briquetes, uma vez que apresentou desempenho superior nos ensaios mecânicos, associado a uma distribuição granulométrica mais adequada ao empacotamento máximo.

Figura 23 – Força máxima medida no ensaio de compressão das diferentes amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu avaliar de forma integrada a influência da mineralogia e da granulometria dos minérios de ferro provenientes das regiões do sudeste e nordeste na qualidade dos briquetes produzidos. Os resultados obtidos demonstram que essas variáveis exercem papel determinante sobre o empacotamento das partículas, a evolução microestrutural e as propriedades mecânicas finais dos aglomerados, em concordância com o que é amplamente reportado na literatura técnica.

As caracterizações mineralógicas realizadas por meio da DRX e da MS evidenciaram diferenças significativas entre os minérios analisados. O minério proveniente do sudeste apresentou predominância da fase hematítica em sua estrutura cristalina, mineral caracterizado por elevada estabilidade térmica e menor porosidade intrínseca. Em contrapartida, o minério do nordeste apresentou maior heterogeneidade mineralógica, com a presença de hematita, magnetita e goethita, refletindo uma composição mineral mais complexa.

A análise térmica (TA) corroborou as diferenças mineralógicas observadas, evidenciando eventos endotérmicos associados à decomposição da goethita no minério do nordeste, com perda de massa na faixa de aproximadamente 240–340 °C (44). Esse comportamento indica menor estabilidade térmica desse minério quando comparado ao minério do sudeste, o qual apresentou maior estabilidade térmica e ausência de variações significativas de massa. Tais resultados estão em conformidade com a literatura (3), que aponta que a presença de água estrutural na goethita pode induzir alterações microestruturais durante o aquecimento, influenciando negativamente a coesão e a integridade dos aglomerados.

No que se refere à granulometria, os resultados demonstraram que a distribuição de tamanho de partículas exerce influência direta no fator de empacotamento e, conseqüentemente, na resistência mecânica dos briquetes. A curva granulométrica do *pellet feed* do sudeste foi a que mais se aproximou do modelo de Andreassen modificado, conforme simulações realizadas no software EMMA. Esse resultado indica que misturas cuja curva granulométrica se aproxima da curva teórica apresentam maior grau de empacotamento, resultando em briquetes mais densos e mecanicamente mais resistentes. Esse comportamento confirma observações reportadas por Kurunov e Bizhanov (9) e por Li et al (14), que destacam a importância de misturas multifracionais para o preenchimento eficiente dos vazios interpartículas.

Os ensaios mecânicos a frio incluindo testes de queda, tamboreamento e compressão uniaxial evidenciaram que os briquetes produzidos a partir do minério do sudeste apresentaram

desempenho superior. Em contraste, os briquetes produzidos a partir do minério do nordeste na qual apresentaram desempenho inferior nos ensaios mecânicos

Esses resultados corroboram com os estudos prévios, como os de Domingues et al. (3), que indicam que minérios predominantemente hematíticos tendem a gerar aglomerados mais densos e mecanicamente mais resistentes. Por outro lado, minérios contendo goethita apresentam maior complexidade microestrutural devido ao processo de desidroxilação, que resulta na formação de hematita secundária acompanhada pela geração de poros adicionais, podendo comprometer a resistência mecânica final dos aglomerados. Adicionalmente, minérios com presença de magnetita tendem a apresentar maior reatividade química, especialmente em ambientes oxidantes, nos quais ocorre a transformação da magnetita em hematita. Embora essa transformação possa contribuir positivamente para a formação de ligações sólidas entre as partículas, favorecendo o aumento da resistência mecânica, as mudanças volumétricas associadas à oxidação podem gerar tensões internas e afetar a estabilidade microestrutural dos aglomerados, exigindo controle rigoroso das condições de processo.

De forma geral, os resultados evidenciam que o controle rigoroso da mineralogia, da granulometria e do comportamento térmico do minério de ferro é essencial para a otimização do processo de briquetagem. A compreensão integrada desses fatores permite não apenas a melhoria das propriedades mecânicas dos briquetes, mas também o aproveitamento mais eficiente de finos de minério, contribuindo para a sustentabilidade do processo produtivo e para a descarbonização da siderurgia, conforme amplamente discutido na literatura contemporânea.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação do desempenho em condições termorreduzidoras, por meio de ensaios de redução sob atmosfera controlada (CO/CO_2) ou H_2), permitindo correlacionar a resistência mecânica a frio com o comportamento em altas temperaturas, simulando condições de alto-forno ou reator de redução direta.
- Realizar a moagem do minério de ferro proveniente da região do nordeste até a granulometria típica de pellet feed, com o objetivo de avaliar a influência da redução do tamanho de partículas sobre a resistência mecânica dos briquetes, bem como sobre suas propriedades físicas associadas, como porosidade e densidade aparente.
- Aplicação de técnicas avançadas de caracterização microestrutural, como microscopia eletrônica de varredura (MEV) associada à espectroscopia por dispersão de energia (EDS), para análise da distribuição de fases, morfologia dos poros e interface partícula–ligante.

REFERÊNCIAS

- 1 World Steel Association. **Sustainability Indicators 2023**. 2023. <<https://worldsteel.org/media/press-releases/2023/sustainability-indicators-2023/>>. Relatório que indica que as emissões de CO₂ da indústria siderúrgica representam cerca de 7% a 8% das emissões globais de gases de efeito estufa.
- 2 MENDONÇA, E. N. d. **Produção de briquetes a partir de finos de carvão vegetal e finos de minério de ferro**. [S.l.], 2025. Caracterização química dos materiais e análise de briquetagem de finos visando maior aproveitamento e redução de impactos ambientais. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/20.500.14387/2269>>.
- 3 DOMINGUES, A. L. A.; BRANDÃO, P. R. G. Análise microestrutural em pastilhas prensadas com diferentes tipos de minérios de ferro (hematítico, magnetítico e goethítico). **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 13, n. 3, p. 252–259, 2016. Estudo comparativo da microestrutura de aglomerados produzidos com minérios de diferentes mineralogias.
- 4 NASCIMENTO, L. M. Avaliação da aplicação de resíduo agroindustrial como agente aglomerante na fabricação de briquetes de pó de despoejamento secundário do convertedor ld. 2022.
- 5 OLIVEIRA, M. F. M. de; SILVA, E. M. S.; LAMEIRAS, F. S.; SILVA, L. F. da; SILVA, A. C. Briquetagem de minério de ferro: Uma revisão. **REVISTA FOCO**, v. 16, n. 12, p. e3432–e3432, 2023.
- 6 GEERDES, M.; TOXOPEUS, H.; VLIET, C. Van der. **Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction**. Amsterdam: IOS Press, 2015. Discusses the effect of fines and ultrafines on bed permeability, gas flow resistance, material losses and particulate emissions in ironmaking reactors. ISBN 978-1-61499-325-8.
- 7 PIETSCH, W. B. **Agglomeration processes: phenomena, technologies, equipment**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.
- 8 LUZ, A.; SAMPAIO, J.; FRANÇA, S. **Tratamento de Minérios**. 5th ed. [S.l.]: CETEM/MCTIC, 2010. ISBN 978-0199543373.
- 9 BIZHANOV, A. **Briquetting in metallurgy**. [S.l.]: CRC Press, 2022.
- 10 VINING, K. R.; KHOSA, J.; SPARROW, G. J. Briquetting conditions for australian hematite-goethite iron ore fines. **ISIJ International**, The Iron and Steel Institute of Japan, v. 57, n. 9, p. 1517–1523, 2017.
- 11 NHETA, W.; LUBISI, T. P.; JELI, E. Effect of different binders on mechanical properties of iron flotation concentrate briquettes. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier, v. 5, n. 1, p. 294–301, 2018.
- 12 MOUSA, E.; LUNDGREN, M.; ÖKVIST, L. S.; FROM, L.-E.; ROBLES, A.; HÄLLSTEN, S.; SUNDELIN, B.; FRIBERG, H.; EL-TAWIL, A. Reduced carbon consumption and co₂ emission at the blast furnace by use of briquettes containing torrefied sawdust. **Journal of Sustainable Metallurgy**, Springer, v. 5, n. 3, p. 391–401, 2019.
- 13 OLUGBADE, T. O.; OJO, O. T. Binderless briquetting technology for lignite briquettes: A review. **Energy, ecology and environment**, Springer, v. 6, n. 1, p. 69–79, 2021.

- 14 LI, Y.; CHEN, H.; HAMMAM, A.; WEI, H.; NIE, H.; DING, W.; OMRAN, M.; YAN, L.; YU, Y. Study of an organic binder of cold-bonded briquettes with two different iron bearing materials. **Materials**, MDPI, v. 14, n. 11, p. 2952, 2021.
- 15 NARITA, C. Y.; MOURAO, M. B.; TAKANO, C. Development of composite briquettes of iron ore and coal hardened by heat treatment. **Ironmaking & Steelmaking**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 42, n. 7, p. 548–552, 2015.
- 16 PEREIRA, A. F. C. Avaliação das propriedades dos concretos de pós reativos produzidos com cimentos portland de alta resistência inicial e cimento portland branco estrutural. Fundação de Ensino e Pesquisa do Sul de Minas, 2019.
- 17 CASTRO, A. D.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, SciELO Brasil, v. 55, p. 18–32, 2009.
- 18 FURNAS, C. Grading aggregates-i.-mathematical relations for beds of broken solids of maximum density. **Industrial & Engineering Chemistry**, ACS Publications, v. 23, n. 9, p. 1052–1058, 1931.
- 19 DINGER, D.; FUNK, J. Particle packing. iii: Discrete versus continuous particle sizes. **Interceram**, v. 41, n. 5, p. 332–334, 1992.
- 20 MORAIS, A. L. S. D.; MARTINS, D. A.; ANDRADE, L. M.; PEREIRA, R. S. F.; OLIVEIRA, T. M. Análise granulométrica: Uma revisão bibliográfica. **Journal of Exact Sciences**, v. 28, n. 1, 2021.
- 21 CULLITY, B. D.; SMOLUCHOWSKI, R. Elements of x-ray diffraction. **Physics Today**, American Institute of Physics, v. 10, n. 3, p. 50–50, 1957.
- 22 MACHADO, R. P.; DORIGUETTO, A. C. Conceitos em cristalografia estrutural: Uma abordagem compreensiva da lei de bragg e do fator de estrutura. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 48, n. 1, p. e–20250064, 2024.
- 23 MURAD, E.; CASHION, J. **Mössbauer spectroscopy of environmental materials and their industrial utilization**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011.
- 24 PIRES, M. J. M. Espectroscopia mössbauer: da física nuclear à verificação de efeitos relativísticos. **Gazeta de Física**, v. 37, p. 10–13, 2014.
- 25 GAISFORD, S.; KETT, V.; HAINES, P. **Principles of thermal analysis and calorimetry**. [S.l.]: Royal society of chemistry, 2016.
- 26 MAGDZIARZ, A. Mechanical strength of briquettes produced from fine-grained materials. **Fuel Processing Technology**, v. 42, p. 131–142, 1995.
- 27 TANAKA, T. Evaluation of drop strength of carbon composite briquettes. **ISIJ International**, v. 38, n. 6, p. 628–634, 1998.
- 28 BOROWSKI, G. Strength tests of briquettes made of fine-grained materials. **Fuel**, v. 83, p. 1541–1547, 2004.
- 29 OZYUGURAN, A.; YAMAN, S. Briquetting of lignite fines using different binders. **Fuel Processing Technology**, v. 92, p. 331–338, 2011.

- 30 MOUSA, E. A. Recycling of steelmaking residues through cold bonded briquetting. **Journal of Hazardous Materials**, v. 246–247, p. 382–391, 2013.
- 31 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Iron ores — Determination of tumble and abrasion indices**. Geneva, 2007.
- 32 JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION. **Testing methods for solid fuels**. Tokyo, 2008.
- 33 SILVA, J. A. **Avaliação da resistência mecânica de briquetes para aplicação metalúrgica**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal, Brasil, 2014.
- 34 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.
- 35 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Rio de Janeiro, 2011.
- 36 SANTOS, L. M.; SILVA, P. H.; FERREIRA, C. A. Estudo do uso de aglomerantes na fabricação de briquetes a partir de resíduos carbonosos e metálicos. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 17, n. 1, p. 34–42, 2020.
- 37 ZHANG, Y.; LI, J.; WANG, S.; LI, C. Effect of sodium silicate as a binder on the mechanical strength and reduction behavior of briquetted iron ore fines. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 6, n. 3, p. 245–252, 2017.
- 38 NUNES, D. M.; ARAÚJO, J. M.; VIEIRA, C. M. F. Avaliação do uso de ligantes inorgânicos e orgânicos na briquetagem de finos de minério de ferro. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 71, n. 2, p. 179–186, 2018.
- 39 LI, G.; ZHANG, X.; ZHAO, H.; LIU, W. Study on the cold strength and metallurgical properties of iron ore briquettes prepared using sodium silicate binder. **Powder Technology**, v. 349, p. 92–100, 2019.
- 40 BRISOLA, D. F. Otimização no preparo de amostras para análise em espectrofotômetro de fluorescência de raios x. CETEM, 2008.
- 41 Japanese Standards Association. **JIS M 8711: Iron ores – Determination of tumble and abrasion indices**. Tokyo: [s.n.], 2008. Japanese Industrial Standard.
- 42 International Organization for Standardization. **ISO 3271: Iron ores – Determination of tumble and abrasion indices**. Geneva: [s.n.], 2015. International Standard.
- 43 PAIVA-SANTOS, C. O. **Aplicações do método de Rietveld**. São Paulo, Brasil: Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2009. Relatório / livro técnico sobre aplicações do método de Rietveld em refinamento de estruturas cristalinas e quantificação de fases.
- 44 YUNUS, N. A.; ANI, M. H.; PURWANTO, H.; SALLEH, H. M.; RASHID, R. Z. A.; AKIYAMA, T. Reduction of briquette composite made of low grade iron ore and biomass ash. **SEASIS Quarterly (South East Asia Iron and Steel Institute)**, South East Asia Iron and Steel Institute, v. 41, n. 4, p. 12–16, 2012.
- 45 PANG, L.; YANG, Y.; WU, L.; WANG, F.; MENG, H. Effect of particle sizes on the physical and mechanical properties of briquettes. **Energies**, MDPI, v. 12, n. 19, p. 3618, 2019.