



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



GUSTAVO FELIPE MENDES

BRIQUETAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA INDÚSTRIA DE FERROLIGAS DE  
MANGANÊS COM DIFERENTES MISTURAS DE AGLOMERANTES

OURO PRETO - MG

2026

GUSTAVO FELIPE MENDES  
gustavo.felipe1@aluno.ufop.edu.br

BRIQUETAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA INDÚSTRIA DE FERROLIGAS DE  
MANGANÊS COM DIFERENTES MISTURAS DE AGLOMERANTES

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof. Dra. Érica Linhares Reis.  
Coorientadora: Prof. Dra. Letícia Maria de Melo Silva Cheloni.

OURO PRETO – MG

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M538b Mendes, Gustavo Felipe.  
Briquetagem de resíduos sólidos da indústria de ferroligas de manganês com diferentes misturas de aglomerantes. [manuscrito] / Gustavo Felipe Mendes. - 2026.  
67 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Erica Linhares Reis.  
Coorientadora: Profa. Dra. Letícia Maria de Melo Silva Cheloni.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Beneficiamento de minério. 2. Resíduos industriais. 3. Manganês.  
4. Ferroligas. 5. Sustentabilidade. I. Reis, Erica Linhares. II. Cheloni,  
Letícia Maria de Melo Silva. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV.  
Título.

CDU 622.7:669.15

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Gustavo Felipe Mendes

### BRIQUETAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA INDÚSTRIA DE FERROLIGAS DE MANGANÊS COM DIFERENTES MISTURAS DE AGLOMERANTES

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 05 de março de 2026

#### Membros da banca

Dra - Érica Linhares Reis- Orientadora - Professora - DEMIN - Universidade federal de Ouro Preto  
Dra - Janine Rodrigues Figueiredo - Pesquisadora Visitante - PPGEM - Universidade Federal de Ouro Preto  
Eng. Alexandre Paolo Santos Gouveia - Mestrando PPGEM - Universidade Federal de Ouro Preto

Érica Linhares Reis, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 06/04/2026



Documento assinado eletronicamente por **Erica Linhares Reis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/04/2026, às 16:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1084721** e o código CRC **050FE118**.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Jesus Cristo, meu Senhor e Salvador, por me sustentar nos momentos difíceis, renovar minhas forças e guiar meus passos nesta caminhada. Reconheço que cada conquista é fruto de sua graça, misericórdia e cuidado constante sobre minha vida.

À minha avó, Maria do Carmo, e à minha mãe, Tamara, expresso profunda gratidão pelo amor, orações e apoio incondicional. Vocês foram meu alicerce e maior fonte de incentivo, levo comigo os valores, a força e a fé que aprendi com vocês.

Aos meus tios, Renison, Reidison e Renerson, agradeço pelo apoio, conselhos e presença constante. O incentivo e a confiança de vocês foram fundamentais para que eu superasse os obstáculos e permanecesse firme em meus objetivos.

À minha orientadora, Érica, e à coorientadora, Letícia, registro minha sincera gratidão pela dedicação e valiosas contribuições neste trabalho. Agradeço também aos professores e à UFOP pela oportunidade de crescimento e aprendizado ao longo do curso.

Aos amigos e a todos que me auxiliaram nesta jornada, deixo meu sincero obrigado. Compartilhar os desafios e as vitórias com quem torce por mim tornou a caminhada mais leve e fundamental para a conclusão deste ciclo.

Por fim, ao meu filho, Álvaro, minha maior inspiração e razão de viver. Você é o meu "porquê" e a luz que iluminou as madrugadas de estudo e os dias de exaustão. É por você que busco evoluir todos os dias, ser um homem melhor e construir um futuro digno, repleto de oportunidades. Esta conquista não é apenas minha, ela é o alicerce de um legado que desejo deixar para você. Seu sorriso é o meu combustível, sua existência dá sentido a cada sacrifício e o amor que sinto por você renova minha força para enfrentar qualquer desafio que o futuro reservar. Tudo o que faço é para que você sinta orgulho do pai que tem.

A todos vocês, minha eterna gratidão.

## RESUMO

A geração de finos durante o beneficiamento de minérios e a produção de ferroligas representa um passivo ambiental e um desafio operacional, visto que esses materiais não podem ser alimentados diretamente em fornos elétricos de redução devido à baixa permeabilidade. Este trabalho avaliou a viabilidade técnica da aglomeração por briquetagem de resíduos sólidos da indústria de ferroligas, utilizando finos de minério de manganês oxidado, pó de despoeiramento de britagem da liga e moinha de carvão vegetal. Foram testadas diferentes misturas de aglomerantes, compostos por componente inorgânico e sistema de aglomerantes orgânico/inorgânico, submetidos à compactação e à cura por 14 dias. A qualidade dos briquetes foi avaliada por meio de ensaios de resistência à compressão, impacto, abrasão, absorção de água e crepitação térmica. Os resultados indicaram que a condição C, composta por maior proporção da mistura de aglomerantes orgânico/inorgânico, apresentou o melhor desempenho global. Esta condição atingiu resistência à compressão média de 2,58 MPa, resistência ao impacto de 99,94% e à abrasão de 99,75%. Diferentemente das formulações com maior teor de componente inorgânico, que se desintegraram em meio aquoso, a condição C manteve a integridade física com absorção de água de 6,99%. O índice de crepitação foi de 0,73%, demonstrando excelente estabilidade térmica a 700°C. Conclui-se que a combinação de aglomerantes orgânicos e inorgânicos produziu briquetes com propriedades mecânicas e metalúrgicas adequadas para o carregamento em fornos elétricos, promovendo o reaproveitamento sustentável de resíduos industriais.

**Palavras-chave:** Briquetagem; Resíduos de manganês; Aglomerantes mistos; Ferroligas; Sustentabilidade.

## ABSTRACT

The generation of fines during ore processing and ferroalloy production represents an environmental liability and an operational challenge, as these materials cannot be directly fed into electric reduction furnaces due to low permeability. This study evaluated the technical feasibility of briquetting agglomeration of solid waste from the ferroalloy industry, using oxidized manganese ore fines, alloy crushing dedusting powder, and charcoal fines. Different binder mixtures were tested, composed of an inorganic component and an organic/inorganic binder system, subjected to compaction and curing for 14 days. Briquette quality was evaluated through compressive strength, impact, abrasion, water absorption, and thermal decrepitation tests. Results indicated that condition C, composed of a higher proportion of the organic/inorganic binder mixture, showed the best overall performance. This condition achieved an average compressive strength of 2.58 MPa, impact resistance of 99.94%, and abrasion resistance of 99.75%. Unlike formulations with a higher inorganic component content, which disintegrated in an aqueous medium, condition C maintained its physical integrity with a water absorption of 6.99%. The decrepitation index was 0.73%, demonstrating excellent thermal stability at 700°C. It is concluded that the combination of organic and inorganic binders produced briquettes with mechanical and metallurgical properties suitable for furnace charging, promoting the sustainable reuse of industrial waste.

**Keywords:** Briquetting; Manganese waste; Mixed binders; Ferroalloys; Sustainability.

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Formas alotrópicas do manganês. ....	12
Tabela 2: Minerais de manganês mais conhecidos. ....	14
Tabela 3: Classificação dos minérios de manganês e seus usos. ....	15
Tabela 4: Visão geral de estudos de briquetagem de finos de minério de manganês e outros resíduos do processo de ferro-ligas de manganês .....	36
Tabela 5: Proporção dos aglomerantes no briquetes. ....	40
Tabela 6: Caracterização de matérias-primas utilizadas na preparação dos briquetes. ....	41
Tabela 7: Composição química de finos oxidados de manganês. ....	41
Tabela 8 Densidade Média Aparente de cada condição. ....	49

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação do fluxograma das etapas operacionais de beneficiamento mineral da Mina Azul, situada em Carajás, Pará. ....	17
Figura 2: Diagrama esquemático de uma gota depositada sobre um sólido, destacando a interação vetorial das energias de interface e a formação do ângulo de contato ( $\theta$ ).....	21
Figura 3: Ilustração didática do interior de um forno elétrico de arco submerso. ....	24
Figura 4: Comparativo entre produtos aglomerados de granulometria fina, destacando as morfologias de sinteres, pelotas e briquetes respectivamente. ....	28
Figura 5: Mecanismos de compactação.....	30
Figura 6: Fluxograma das etapas gerais do processo de briquetagem e confecção dos briquetes. ....	38
Figura 7: Quateador Carossel.....	39
Figura 8: Quateador Jones. ....	39
Figura 9: Pilha tipo Alongada (A); Pilha do tipo cônica (B). ....	40
Figura 10: Matérias primas (A e B: Orgânico/Inorgânico; C: Componente inorgânico; D: Fino de Manganês; E: Carvão vegetal; F: Pó da liga metálica).....	42
Figura 11: Homogeneização dos finos de manganês e aglomerantes antes do processo de compactação. ....	42
Figura 12: Molde utilizado na fabricação dos briquetes. ....	43
Figura 13: Representação esquemática do ensaio de resistência ao impacto. ....	44
Figura 14: Esquema do ensaio de compressão.....	46
Figura 15: Briquete antes dos ensaios (Condição A). ....	49
Figura 16: Resultados dos ensaios de resistência ao impacto. ....	50
Figura 17: Resultados dos ensaios de resistência à abrasão .....	51
Figura 18: Resultados dos ensaios de resistência à absorção de água.....	53
Figura 19: Resultados dos ensaios de resistência à compressão. ....	54
Figura 20: Resultados dos ensaios de crepitação. ....	56

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>11</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	11
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	11
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>12</b>
3.1	MANGANÊS E MINÉRIO DE MANGANÊS. ....	12
3.2	GERAÇÃO DOS FINOS DE MANGANÊS NA INDÚSTRIA MINERO METALÚRGICA .....	16
3.2.1	Beneficiamento e a Especificidade dos Minérios Oxidados da região Norte do Brasil.....	16
3.2.2	Geração de finos na Indústria Metalúrgica e a Recuperação de Unidades de Manganês.....	18
3.2.3	Geração de Finos de Redutor (Moinha de Carvão) .....	18
3.2.4	Aglomerantes .....	19
3.3	PRODUÇÃO DE FERROLÍGAS DE MANGANÊS.....	23
3.3.1	Zonas de Reação e Termodinâmica do Processo .....	24
3.3.2	Tipos de Ligas e Composições Comerciais .....	25
3.3.3	Termodinâmica da Escória .....	26
3.4	BRIQUETAGEM .....	27
3.4.1	Mecanismos de Ligação e a Física da Compactação .....	28
3.4.2	Etapas do Fluxo Industrial e Tratamento de Cura .....	30
3.5	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS BRIQUETES .....	31
3.5.1	Resistência à Compressão.....	32
3.5.2	Resistência ao Impacto .....	32
3.5.3	Resistência à Abrasão .....	32
3.5.4	Absorção de Água .....	33
3.5.5	Densidade Aparente .....	33
3.5.6	Crepitação .....	34
3.6	PANORAMA DOS PARÂMETROS DE BRIQUETAGEM DE FINOS DE MANGANÊS E RESÍDUOS INDUSTRIAIS METALÚRGICOS .....	35
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>37</b>
4.1	PREPARAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS E ELABORAÇÃO DOS BRIQUETES .....	37
4.2	ENSAIOS PARA A AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS BRIQUETES.....	43

4.2.1 Resistência ao impacto.....	43
4.2.2 Resistência à abrasão .....	44
4.2.3 Absorção de água.....	45
4.2.4 Resistência à compressão .....	45
4.2.5 Ensaio de Crepitação .....	46
4.2.6 Densidade Aparente .....	48
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>49</b>
5.1 BRIQUETES.....	49
5.2 RESISTÊNCIA AO IMPACTO .....	50
5.3 RESISTÊNCIA À ABRASÃO.....	51
5.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA .....	52
5.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	54
5.6 ENSAIO DE CREPITAÇÃO.....	55
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na produção de ferroligas de manganês, matérias-primas finas não podem ser introduzidas diretamente nos fornos elétricos de redução. Nesse cenário, a briquetagem destaca-se como uma técnica de aglomeração simples e econômica, baseada na aplicação de pressão para compactar partículas, que dispensa moagem prévia e oferece flexibilidade granulométrica (BY, 2017). O reaproveitamento de finos de minério, gerados expressivamente no beneficiamento, é vital para mitigar os desafios logísticos e ambientais da indústria (OLSEN et al., 2007; CHELONI et al., 2024). Transformá-los em briquetes viabiliza sua reutilização, reduzindo os impactos do descarte, minimizando custos de estocagem e promovendo a economia circular (DIAZ et al., 2021).

A briquetagem é um processo de aglomeração de partículas finas que utiliza forças interparticulares (Van der Waals e eletrostática), umidade ou aglomerantes para formar briquetes coesos e resistentes. A adição de aglomerantes é essencial para garantir a integridade do briquete, influenciando diretamente sua resistência mecânica, estabilidade térmica, desempenho e custo (PIETSCH, 2002; ZHANG et al., 2018).

A incorporação de subprodutos regionais, como a moimha de carvão vegetal e o pó de despoejamento do britador, agrega valor técnico e sustentável aos briquetes. Devido ao seu elevado teor de carbono fixo, o carvão atua como excelente agente redutor carbotérmico nas reações com óxidos metálicos. Simultaneamente, o pó de ferromanganês contribui para a composição metálica e a resistência estrutural do aglomerado, viabilizando a substituição do minério granulado (CHELONI et al., 2025). Neste contexto, este estudo avaliou a influência de diferentes combinações de aglomerantes nas propriedades de briquetes elaborados com finos de minério de manganês provenientes da região Norte do Brasil. A pesquisa fixou as variáveis como proporção dos aglomerantes, pressão de compactação e tempo de cura, visando atender aos requisitos físicos necessários para o carregamento em fornos de redução. O estudo contribui para a indústria mínero-metalúrgica ao transformar resíduos em produtos de valor, reduzindo perdas e impactos ambientais. A briquetagem, com uso de aglomerantes e subprodutos, surge como solução técnica sustentável e inovadora para o reaproveitamento de finos na produção de ferroligas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar a viabilidade técnica da produção de briquetes a partir de resíduos da indústria de ferroligas, por meio de diferentes misturas de aglomerantes, visando sua aplicação em fornos elétricos de redução.

### **2.2 Objetivos específicos**

- I. Fabricar briquetes a partir da aglomeração de resíduos da indústria de ferroligas (finos de minério de manganês oxidado, pó de despoeiramento da liga metálica e moinha de carvão vegetal), através de prensagem uniaxial, variando as proporções do aglomerante inorgânico e o sistema de aglomerantes orgânico/inorgânico em três condições distintas, mantendo constantes a pressão de compactação e o tempo de cura.
- II. Determinar a resistência mecânica dos briquetes produzidos por meio de ensaios de resistência à compressão uniaxial, resistência ao impacto e resistência à abrasão.
- III. Avaliar as propriedades físicas dos aglomerados, mensurando a densidade aparente e o comportamento frente à umidade através de ensaios de absorção de água.
- IV. Analisar a estabilidade térmica dos briquetes mediante ensaios de crepitação a 700°C, verificando a influência da combinação de aglomerantes orgânicos e inorgânicos na integridade do material sob choque térmico.
- V. Comparar o desempenho das diferentes formulações testadas para identificar a condição que ofereça o melhor equilíbrio entre resistência mecânica, estabilidade térmica e resistência à água para aplicação industrial.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo traz uma revisão da literatura sobre os temas relevantes para este estudo.

#### 3.1 Manganês e minério de manganês.

Dada a sua essencialidade estratégica para a siderurgia, o manganês (Mn) destaca-se por uma natureza físico-química complexa, evidenciada por quatro modificações estruturais distintas. Sob pressão atmosférica, o metal manifesta essas modificações estruturais conforme a temperatura. A fase estável em condições ambientes é a  $\alpha$ -Mn, que possui uma estrutura cúbica complexa com 58 átomos na célula unitária e densidade de 7,44 g/cm<sup>3</sup>, permanecendo nesse estado até 727 °C. Acima desta temperatura, ocorre a transição para a fase  $\beta$ -Mn, estável até 1090 °C, caracterizada por uma estrutura cúbica complexa com 20 átomos na rede básica e densidade levemente reduzida para 7,29 g/cm<sup>3</sup>. Subsequentemente, entre 1090 °C e 1138 °C, o metal assume a forma  $\gamma$ -Mn com estrutura de face centrada cúbica (CFC) e densidade de 6,37 g/cm<sup>3</sup>, atingindo a fase  $\delta$ -Mn (cúbico de corpo centrado, CCC) acima de 1138 °C, a 1143 °C com densidade de 6,28 g/cm<sup>3</sup> (TANGSTAD, 2013).

As propriedades detalhadas dessas fases alotrópicas estão organizadas na Tabela 1:

Tabela 1: Formas alotrópicas do manganês.

Estrutura	Densidade	Espaçamento Atômico	Faixa Temperatura
$\alpha$ - Mn	7,44 g/cm <sup>3</sup>	0,89124 nm	Abaixo 727°C
$\beta$ - Mn	7,29 g/cm <sup>3</sup>	0,6289 nm	727°C até 1090°C
$\gamma$ - Mn	6,37 g/cm <sup>3</sup>	0,3855 nm	1090°C até 1138°C
$\delta$ - Mn	6,28 g/cm <sup>3</sup>	0,3075 nm	Acima 1138°C

Fonte: Adaptado de Tangstad (2013).

Fisicamente, o manganês apresenta uma coloração branco-acinzentada que remete ao ferro, porém distingue-se por ser consideravelmente mais duro e

quebradiço. Possui ponto de fusão de 1244 °C e ponto de ebulição de 2150 °C. Na indústria metalúrgica, sua importância é tamanha que cerca de 90% da produção mundial é absorvida pela siderurgia, com um consumo médio de 10 kg de manganês para cada tonelada de aço produzida (TANGSTAD, 2013).

No aço, o manganês desempenha múltiplas funções: atua como elemento de liga para elevar a tenacidade, dureza e temperabilidade, além de ser fundamental no controle do enxofre e na desoxidação do banho metálico. Ao combinar-se com o enxofre, ele evita a formação de sulfetos de ferro, prevenindo o fenômeno da fragilidade a quente (*hot shortness*). Sua capacidade de estabilizar a austenita (ferro gama) é potencializada quando associada ao nitrogênio, melhorando a resposta do material ao processo de têmpera (Matricardi e Downing, 1995). Além do setor siderúrgico, o elemento possui aplicações industriais relevantes em baterias, pigmentos, fertilizantes e na fabricação de agentes químicos (POSTLE *et al.*, 2015).

Do ponto de vista mineralógico, o manganês é encontrado na natureza em mais de 300 minerais, embora poucos apresentem viabilidade econômica devido aos teores encontrados. Essa complexidade decorre da capacidade do elemento de assumir diferentes estados de oxidação (valências +2, +3 e +4). As ocorrências mais frequentes são na forma de óxidos e carbonatos, enquanto silicatos e sulfetos aparecem com menor regularidade (MATRICARDI e DOWNING, 1995). Uma lista completa dos minerais de manganês conhecidos, categorizados por sua natureza química e propriedades, é apresentada na Tabela 2.

A classificação técnica e comercial dos minérios de manganês baseia-se primordialmente no teor de Mn presente e na finalidade de aplicação (MATRICARDI e DOWNING, 1995; GASIK *et al.*, 2009). Conforme proposto por De Jesus (2020), os minérios são divididos em três classes: minérios de alto teor (acima de 35% de Mn), utilizados em fornos elétricos a arco (FEAs) para a produção de ferroligas; minérios ferruginosos (10% a 35% de Mn), com alta concentração de ferro; e minérios mángano-ferrosos (5% a 10% de Mn), destinados a altos-fornos para ajuste do teor de manganês no ferro gusa.

Tabela 2: Minerais de manganês mais conhecidos.

Classificação Mineral	Nome do Mineral	Composição Química	Teor de Mn (%)
<b>Óxidos</b>	Pirolusita	MnO <sub>2</sub>	63,2
	Vernadita	MnO <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O	44 — 52
	Braunita	3(Mn,Fe) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · MnSiO <sub>3</sub>	48,9 — 56,1
	Braunita II	7(Mn,Fe) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · CaSiO <sub>3</sub>	52,6
	Manganita	γ-MnOOH	62,5
	Psilomelana	(K,Ba)(Mn <sup>2+</sup> Mn <sup>4+</sup> ) <sub>8</sub> O <sub>16</sub> (OH) <sub>4</sub>	48,6 — 49,6
	Criptomelana	(K,Ba)Mn <sub>8</sub> O <sub>16</sub> · xH <sub>2</sub> O	55,8 — 56,8
	Hollandita	(Ba,K)Mn <sub>8</sub> O <sub>16</sub> · xH <sub>2</sub> O	42,5
	Todorokite	(Ca,Na,K)(Mn <sup>2+</sup> Mn <sup>4+</sup> ) <sub>6</sub> O <sub>12</sub> · xH <sub>2</sub> O	49,4 — 52,2
	Hausmannita	(Mn,Fe) <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	64,8
	Jacobsite	Fe <sub>2</sub> MnO <sub>4</sub>	23,8
	Bixbyíta	(Mn,Fe) <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	55,6
	<b>Carbonatos</b>	Manganocalcita	(Mn,Ca)CO <sub>3</sub>
Oligonita		(Fe,Mn)CO <sub>3</sub>	23 — 32
Rodocrosita		MnCO <sub>3</sub>	47,6
<b>Silicatos</b>	Rodonita	MnSiO <sub>3</sub>	42
	Tephroíta	Mn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	54,4
<b>Sulfetos</b>	Alabandita	MnS	63,2
	Hauerita	MnS <sub>2</sub>	46,2

Fonte: Adaptado de Tangstad (2013).

Para além da concentração absoluta de manganês, a viabilidade econômica e técnica de um depósito mineral é condicionada pela relação geoquímica entre o ferro e o manganês, dada a afinidade desses elementos na natureza (GONÇALVES e SEFARTY, 1976; TANGSTAD, 2013). No meio acadêmico e industrial brasileiro, é amplamente adotada a classificação proposta por Gonçalves e Sefarty (1976), que define o minério de manganês como aquele que apresenta uma razão Mn/Fe  $\geq$  4, caso essa proporção seja inferior a 4, o material é tecnicamente categorizado como um depósito de ferro-manganês.

Contudo, para a metalurgia, essa distinção torna-se ainda mais crítica. Segundo Tangstad (2013), a produção da liga padrão de Ferromanganês de Alto

Carbono (com 78% de Mn) impõe critérios rígidos à carga, exigindo minérios com uma razão Mn/Fe em peso superior a 7,5, a fim de garantir o teor especificado no produto final. Além disso outro parâmetro determinante é a morfologia física do material, que dita o seu comportamento reológico e térmico dentro dos reatores (GASIK, 1992; KUTSYN *et al.*, 2012). Segundo Olsen *et al.* (2007), os produtos são classificados conforme a granulometria em:

- Granulado: Materiais com dimensões entre 6,0 mm e 75,0 mm.
- Fino: Materiais com granulometria inferior a 6,0 mm.
- *Sinter feed*: Fração específica situada entre 0,150 mm e 6,35 mm, destinada aos processos de aglomeração por sinterização.

A correlação detalhada entre as classes de minério, suas especificações físicas e as finalidades de aplicação metalúrgica está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3: Classificação dos minérios de manganês e seus usos.

<b>Categoria do Minério</b>	<b>Teor de Mn (%)</b>	<b>Aplicações/Características</b>
Minério de manganês	> 35	Produção de ligas metálicas diversas
Alto teor	> 46	Utilização direta em processos de alto-forno
Médio teor	34 — 46	Exige processos prévios de beneficiamento
Minérios ferruginosos	15 — 35	Produção de ligas voltadas à siderurgia (aço)
Ferro-manganês	29 — 36	Empregado em ligas para aço
Minério de ferro manganésífero	5 — 10	Teor de Fe próximo a 30%; impurezas (Sílica+Al) < 20%
Ferro com manganês	Sem especificação	Conteúdo de ferro é predominante ao de manganês
Protominério	Teores reduzidos	Viável via métodos de concentração

Fonte: Adaptado de Mendes e Oliveira (1982).

No contexto geopolítico e econômico, o Brasil desempenha um papel de protagonismo, figurando entre os maiores produtores mundiais (USGS, 2018). As reservas nacionais (medidas e indicadas) somam aproximadamente 587 milhões de toneladas, com um teor médio de manganês de 32,5% (SANTANA, 2020). Embora o estado de Minas Gerais detenha o maior volume de reservas, a Região Norte, especialmente o estado do Pará, assume uma posição estratégica com as minas de Carajás e do Azul, que totalizam aproximadamente 25 milhões de toneladas de reservas. A relevância da produção no Norte justifica o estudo dos resíduos gerados nessas operações, uma vez que a extração e o beneficiamento em larga escala nessa região resultam em volumes significativos de finos (ANM, 2017; DE JESUS, 2020). A necessidade de aglomeração e reaproveitamento desses materiais é acentuada pela busca por eficiência logística e pelo controle de impurezas, como o fósforo e a sílica, garantindo que o potencial mineral do Norte seja plenamente aproveitado pela indústria siderúrgica (GASIK, 1992; DE JESUS, 2020).

### **3.2 Geração dos finos de manganês na indústria minero metalúrgica**

A exploração e o beneficiamento do manganês enfrentam desafios crescentes devido à complexidade mineralógica dos depósitos e, predominantemente, à geração massiva de materiais conhecidos como finos de minério de manganês. Atualmente, estima-se que cerca de 30% do material gerado durante o processamento do minério de manganês apresente granulometria inferior à especificada para operação em fornos elétricos de arco submerso (OLSEN; TANGSTAD; LINDSTAD, 2007; FARIA *et al.*, 2013; COETSEE, 2019b; DE JESUS; TANGSTAD, 2020, 2021).

O acúmulo de finos cria gargalos logísticos e riscos operacionais. Na metalurgia, o material reduz a permeabilidade do leito e a taxa de redução, favorecendo explosões pelo confinamento de gases. Assim, a compreensão das fontes de geração desses resíduos, tanto na mineração quanto na metalurgia, é o primeiro passo para viabilizar sua reintegração ao ciclo produtivo por meio da briquetagem (BY, 2017; DE JESUS, 2020; DIAZ *et al.*, 2021; CHELONI *et al.*, 2023).

#### **3.2.1 Beneficiamento e a Especificidade dos Minérios Oxidados da região Norte do Brasil**

O beneficiamento do manganês é direcionado quase exclusivamente à adequação granulométrica, visto que as etapas de concentração mineral convencional possuem baixa eficiência para este metal (CRAVEN, 1997). Em operações típicas de processamento mineral, o minério bruto é submetido a uma sequência de britagem, peneiramento e classificação (DE JESUS, 2020). Conforme ilustrado na Figura 1.

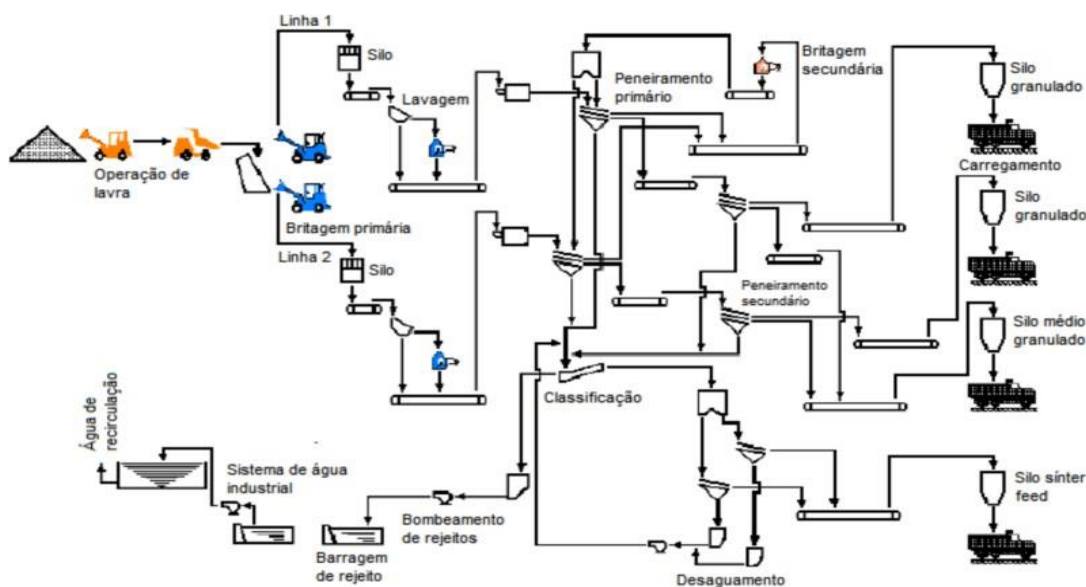


Figura 1: Representação do fluxograma das etapas operacionais de beneficiamento mineral da Mina Azul, situada em Carajás, Pará.

Fonte: Madias (2011).

Após a cominuição, no processo de classificação por peneiramento, obtém-se o minério granulado (*Lump*) e o Médio, enquanto a fração muito fina, denominada Sinter Feed, é frequentemente descartada como rejeito em unidades que carecem de processos de sinterização (SANTANA, 2009; DE JESUS, 2020). Paralelamente, no sistema de recuperação de finos, processos de hidrociclonagem e desaguamento capturam partículas ultrafinas que, por não serem aproveitadas, são enviadas para as barragens de rejeitos (DE JESUS, 2020).

Esses finos apresentam um desafio físico que impossibilita seu aproveitamento direto devido ao comprometimento da permeabilidade do leito (EISELE e KAWATRA, 2003; BIZHANOV *et al.*, 2014). Enquanto a geração desses materiais é massiva, a operação dos fornos elétricos de arco submerso (FEAS) é restringida por rígidos critérios de segurança, nos quais são estabelecidos que o limite recomendado para a carga de finos é de 15% em fornos fechados e 25% em fornos abertos (POCHART et

al. 2007). Uma vez que a geração desses resíduos frequentemente ultrapassa esses patamares operacionais, a aglomeração torna-se a via estratégica para mitigar a perda de unidades metálicas e reduzir a pegada ambiental do processo produtivo (DIAZ *et al.*, 2021).

### 3.2.2 Geração de finos na Indústria Metalúrgica e a Recuperação de Unidades de Manganês

Para além da exploração e beneficiamento de minério, a própria planta metalúrgica de ferroligas é uma geradora contínua de resíduos ricos em manganês. Segundo a classificação proposta por By (2017), os finos coletados no ambiente industrial podem ser classificados em três categorias:

- **Poeiras de Britagem** (*Crushing Fines*): Geradas durante o processamento físico tanto do minério quanto da liga metálica acabada (*finished alloy*). Por serem excessivamente pequenos para venda ou para compor a carga do forno, esses materiais de alto teor são frequentemente segregados.
- **Poeira de Filtros** (*Filter/Baghouse Dust*): Material particulado seco capturado pelos sistemas de exaustão e filtros de mangas, localizados acima do teto do forno e nas coifas das seções de vazamento (*tapping*).
- **Lamas** (*Sludges*): Originadas em sistemas de limpeza de gases via úmida. As partículas são capturadas pela água de processo e espessadas, formando um resíduo pastoso com alto potencial de reaproveitamento.

### 3.2.3 Geração de Finos de Redutor (Moinha de Carvão)

O carvão vegetal, embora essencial na siderurgia brasileira, possui alta friabilidade, gerando cerca de 25% de finos (< 9 mm) durante o transporte e manuseio, resíduo conhecido como moinha de carvão vegetal (SILVA *et al.*, 2016). O uso direto desses finos no forno é inviável, pois eles obstruem a circulação de gases, reduzindo a permeabilidade e gerando riscos operacionais como o engaiolamento e acúmulo perigoso de pressão (EISELE e KAWATRA, 2003; BIZHANOV *et al.*, 2014; LEÃO,

2021). Como solução estratégica, a briquetagem com a moinha permite criar compósitos autorredutores que atuam como fonte interna de calor para fornos de redução (AYYANDURAI e PAL, 2021).

#### 3.2.4 Aglomerantes

Aglomerantes (ou ligantes) são substâncias adicionadas a misturas minerais para unir partículas quando a pressão de compactação é insuficiente. Eles garantem a resistência mecânica necessária ao manuseio e transporte, além de influenciarem a porosidade e a reatividade metalúrgica do briquete (CARVALHO *et al.*, 2018).

Nesse sentido, a seleção do aglomerante adequado é uma etapa crítica e deve equilibrar o ganho de resistência mecânica com a preservação da química do processo. A adequação de um ligante é determinada por sua capacidade de conferir adesão às partículas sem causar contaminação ao produto final (EISELE e KAWATRA, 2003; CARVALHO *et al.*, 2018). Para que sejam considerados ideais esses aglomerantes devem possuir custo aceitável e ampla disponibilidade, não liberar elementos danosos ao meio ambiente, além de evitar a introdução de elementos deletérios à liga metálica, como fósforo e enxofre (SAH e DUTTA, 2010).

De acordo com o mecanismo de atuação na mistura, os aglomerantes podem ser divididos em três categorias funcionais principais (Carvalho *et al.*, 2018), conforme detalhado no Quadro 1.

Quadro 1: Classificação dos aglomerantes conforme sua função na mistura.

TIPO DE AGLOMERANTES	MECANISMO DE ATUAÇÃO	EXEMPLOS COMUNS
TIPO MATRIZ	As partículas ficam embutidas em uma fase substancialmente contínua; as propriedades do briquete são dominadas pelo ligante.	Cimento, Alcatrão, Melão
TIPO FILME	Atuam como colas adesivas, dependendo da evaporação de solventes ou água para desenvolver resistência.	Silicatos, Amidos, Resinas
TIPO QUÍMICO	Promovem a adesão através de reações químicas internas, podendo atuar como matriz ou filme.	Silicato de Sódio

Fonte: Adaptado de Carvalho *et al.* (2018)

Para que um aglomerante líquido seja eficiente, ele deve recobrir a superfície das partículas sólidas de forma completa, processo conhecido como molhabilidade. A eficácia dessa conexão é medida pelo ângulo de contato ( $\theta$ ). Um baixo ângulo de contato garante um contato íntimo entre o ligante e o mineral, resultando em aglomerados mais resistentes (DELLA BONA, 2005).

A força de ligação é descrita pelo Trabalho de Adesão ( $W_a$ ), que deve ser maximizado para garantir a estabilidade do briquete. Este parâmetro é regido pela Equação de Young-Dupré, que relaciona as energias livres de superfície das interfaces envolvidas (Equação 1). A interação vetorial dessas energias e a configuração física resultante podem ser observadas na Figura 2, que detalha a formação do ângulo de contato ( $\theta$ ) em uma gota depositada sobre a superfície sólida.

$$W_a = \gamma L_{ar} (1 + \cos \theta) \quad (1)$$

Onde:

- $W_a$ : Trabalho de adesão;
- $\gamma L_{ar}$ : Energia de superfície na interface líquido-ar;

- $\theta$ : Ângulo de molhagem (contato).

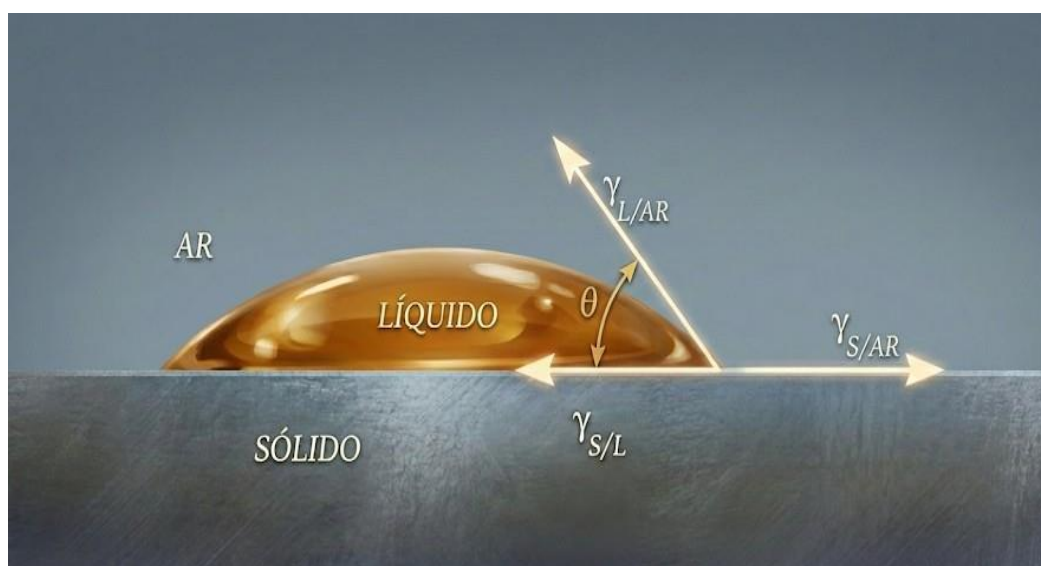


Figura 2: Diagrama esquemático de uma gota depositada sobre um sólido, destacando a interação vetorial das energias de interface e a formação do ângulo de contato ( $\theta$ ).

Fonte: Adaptado de Della Bona (2005).

A bentonita é o aglomerante de referência na indústria mineral. Trata-se de uma argila constituída essencialmente pelo argilomineral montmorilonita, um filossilicato 2:1 composto por uma folha octaédrica de alumina entre duas folhas tetraédricas de sílica ( $\text{SiO}_4$ ) (ROSS *et al.*, 1926; DARLEY *et al.*, 1988; PAIVA *et al.*, 2007).

Sua principal característica é a elevada capacidade de inchamento em presença de umidade. Quando as lamelas da montmorilonita entram em contato com a água, ocorre a adsorção de moléculas de água no espaço interlamelar, expandindo o volume da argila e formando um gel tixotrópico que preenche os vazios entre as partículas de minério (BRINDLEY *et al.*, 1955; PAIVA *et al.*, 2007; DARLEY *et al.* 1988). Uma elevada resistência mecânica conferida aos aglomerados se consolida na etapa de secagem, em que a bentonita atua como um aglomerante do tipo filme inativo. À medida que a umidade é removida, esse gel se retrai, aproximando os grãos do minério e criando pontes sólidas firmemente unidas por forças eletrostáticas e de Van der Waals (MINERAL PROCESSING..., 2002; EISELE e KAWATRA, 2003)

Existem dois tipos de bentonita:

- **Bentonitas sódicas** ( $\text{Na}^+$ ): Apresentam maior capacidade de expansão (até 40,0 Å) (LUMMUS *et al.*, 1986).
- **Bentonitas cálcicas** ( $\text{Ca}^{2+}$ ): Possuem inchamento limitado devido às fortes interações elétricas entre as camadas (SILVA e FERREIRA, 2008).

Apesar da eficiência estrutural, a bentonita introduz sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ao processo (PAIVA *et al.*, 2007). No contexto da metalurgia, esses óxidos são indesejáveis, e sua presença é prejudicial por reduzir o teor metálico global e elevar a geração de escória no forno (CARVALHO *et al.*, 2018). Esse cenário justifica a transição para aglomerantes de base orgânica e química, que asseguram o desempenho de adesão sem incorporar impurezas sólidas ao aglomerado final, resultando em um processo mais limpo e eficiente (ZHOU e KAWATRA 2017; ZHANG, SUN e XU 2018).

A mistura de cal hidratada [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] e melaço é uma alternativa estratégica que combina propriedades de aglomerantes do tipo matriz e químico. O melaço, subproduto do refino de açúcar, é rico em sacarose, que atua como o agente ativo na reação. (HALT e KAWATRA, 2014; CARVALHO *et al.*, 2018; PANNETIER *et al.*, 2000).

O mecanismo de endurecimento ocorre em duas etapas, baseadas na formação de uma rede mineral *in situ* (SAH e DUTTA, 2010; HALT e KAWATRA, 2014; BY, 2017):

- **Formação do Sacarato:** A sacarose reage com a cal hidratada para formar o complexo de sacarato de cálcio, que provê a adesão inicial.
- **Carbonatação:** Com o tempo e a exposição ao ar, o sacarato reage com o  $\text{CO}_2$  atmosférico, formando uma rede rígida de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e recristalizando a sacarose, que atua como catalisador da reação.
  1. Sacarose +  $\text{Ca}(\text{OH})_{2(s)}$  → Sacarato de cálcio +  $\text{H}_2\text{O}_{(l)}$
  2. Sacarato de cálcio +  $\text{CO}_{2(g)}$  → Sacarose +  $\text{CaCO}_{3(s)}$

Uma vantagem dos aglomerantes orgânicos sobre a bentonita é a ausência de resíduos sólidos após a queima, esses ligantes deixam praticamente zero impurezas no aglomerado final (ZHOU e KAWATRA 2017; ZHANG *et al.*, 2018). Contudo, o fenômeno de queima impõe restrições. Estudos indicam que a temperatura de decomposição para aglomerantes orgânicos ocorre em torno de 300 °C, se a decomposição for excessivamente rápida, podem surgir trincas internas no briquete (BY, 2017).

Neste contexto, a presença da cal é vital, enquanto a parte orgânica do aglomerante é eliminada na fase gasosa ao atingir 300 °C, a rede de carbonato de cálcio formada pela carbonatação sustenta a estrutura do briquete até que temperaturas superiores iniciem a sinterização das partículas de minério, evitando a desintegração da carga no topo do forno (BY, 2017).

### **3.3 Produção de ferrolígas de manganês.**

A destinação primordial do minério de manganês beneficiado é a manufatura de ferrolígas, as quais figuram como componentes fundamentais na produção de aços. (TANGSTAD, 2013; POSTLE *et al.*, 2015; DE JESUS, 2020).

A produção industrial de ferrolígas de manganês é realizada majoritariamente em Fornos Elétricos a Arco Submerso (FEAS), também referidos na literatura internacional como *Submerged Arc Furnaces* (SAF). O princípio de operação deste equipamento baseia-se em um processo simultaneamente eletrotérmico e carbotérmico, onde a energia elétrica é convertida em calor por meio do efeito Joule no leito do coque, enquanto o carbono atua como o agente redutor químico para converter os óxidos em metal (TANGSTAD, 2013).

De acordo com By (2017), o forno opera com a carga alimentada pelo topo, onde a matéria-prima reage com o carbono proveniente de três fontes distintas: o leito de coque, os próprios eletrodos e o gás monóxido de carbono (CO). O esquema interno e a disposição dos eletrodos são importantes para a distribuição térmica, conforme ilustrado na Figura 3.

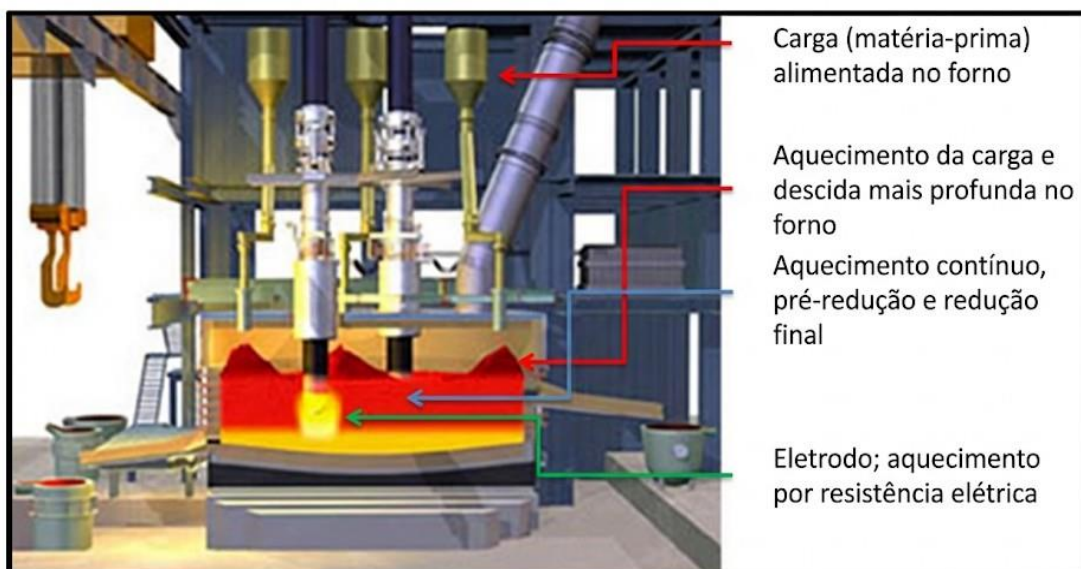


Figura 3: Ilustração didática do interior de um forno elétrico de arco submerso.

Fonte: Adaptado de By (2017).

Os fornos modernos são equipamentos de grande porte, com capacidades entre 20 e 90 MVA, operando de forma contínua com eletrodos do tipo Søderberg (autoconsumíveis) ou retangular de seis eletrodos, a carga sólida é distribuída por gravidade através de calhas (chutes), enquanto o metal e a escória são vazados periodicamente por furos de corrida localizados na base do forno. A depender do projeto da planta, o vazamento pode ocorrer de forma simultânea pelo mesmo orifício ou separadamente em furos de metal e escória distintos, geralmente posicionados com uma defasagem vertical de 0,5 a 1 m (TANGSTAD, 2013).

### 3.3.1 Zonas de Reação e Termodinâmica do Processo

A produção de ferroligas de manganês em FEAs opera sob o princípio da contracorrente: a carga sólida descende enquanto os gases quentes ascendem (DE JESUS, 2020). Termodinamicamente, o processo divide-se em duas regiões principais:

#### a) Zona de Pré-Redução

Localizada no topo do forno, esta zona funciona como um trocador de calor onde a carga permanece predominantemente no estado sólido. O minério que desce entra em contato com o gás monóxido de carbono (CO) que ascende do fundo do forno, promovendo a remoção gradual de oxigênio das matérias-primas oxidadas ( $\text{MnO}_2 \rightarrow \text{Mn}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Mn}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{MnO}$ ). As reações iniciais nessa zona do forno são exotérmicas (liberam calor). Essa característica química é fundamental, pois a própria reação auxilia no aquecimento da carga, reduzindo a necessidade de energia elétrica externa nesta etapa do processo (DE JESUS, 2020; OLSEN *et al.*, 2007).

#### b) Zona do Leito de Coque

Situada no fundo do forno, na extremidade dos eletrodos, é a região de temperatura mais elevada onde ocorre a fusão (estado líquido). Nessa zona, o material se funde e escorre por um leito de fragmentos de coque sólido, onde o MnO líquido reage para formar o metal final (BY, 2017; DE JESUS, 2020). Diferente da zona superior, esta etapa é fortemente endotérmica, com uma entalpia de reação de 252,3 kJ, o que significa que o processo consome uma quantidade massiva de calor (BY, 2017). A extremidade do eletrodo é alocada na parte superior da camada de coque, permitindo a passagem da corrente que flui através das partículas de coque, convertendo energia elétrica em calor intenso, garantindo a temperatura necessária para a fusão e a redução final do manganês (DE JESUS, 2020).

### 3.3.2 Tipos de Ligas e Composições Comerciais

O produto final do FEAs varia conforme a carga e os parâmetros operacionais, as ligas de manganês são classificadas pelos seus teores de carbono (C) e silício (Si), embora suas especificações comerciais também variem significativamente em função dos níveis de fósforo (P) e nitrogênio (N) (DING e OLSEN, 1996; TANGSTAD, 2013).

Segundo Tangstad (2013) o controle do fósforo é particularmente desafiador para a metalurgia do manganês, quando se utiliza minérios com teores de fósforo superiores a 0,2%, a remoção deste elemento não costuma ser viável durante as etapas de beneficiamento ou aglomeração. Por esse motivo, e pela escassez de

minérios de manganês naturalmente pobres em fósforo, o mercado siderúrgico paga um valor adicional por ligas que garantam baixos teores deste elemento. O nitrogênio, por sua vez, é controlado especialmente em ligas nitretadas para aplicações em aços inoxidáveis e aços-liga.

De acordo com os estudos de Liu (1993) e Postle *et al.* (2015), o mercado é segmentado por três tipos principais de ligas:

- Ferro Sílico-Manganês (FeSiMn): Composta por 15% a 20% de silício e 1,5% a 2% de carbono, representando cerca de 70% da produção total de ligas de Mn.
- Ferro-Manganês de Alto Carbono (FeMnAC): Contendo entre 7% e 8% de carbono, perfazendo 20% do mercado.
- Ferro-Manganês Refinado (Médio e Baixo Carbono): Ligas com teores de carbono variando de 0,1% a 2%, que respondem pelos 10% remanescentes da produção global.

A solubilidade do carbono na liga é inversamente proporcional ao teor de silício, como demonstrado por Ding e Olsen (1996), a adição de silício altera a atividade química do sistema, reduzindo a solubilidade do carbono de 8% (em sistemas Mn-C saturados) para apenas 1,8% (em ligas com 18% de Si) sob uma temperatura de 1500 °C.

### 3.3.3 Termodinâmica da Escória

A eficiência da produção é medida pela partição do manganês entre o metal e a escória (DING E OLSEN, 1996; TANGSTAD, 2013). Ding e Olsen (1996) explicam que o teor de MnO residual na escória é determinado pelo equilíbrio termodinâmico, sendo influenciado pela temperatura, pressão parcial de CO e basicidade da escória. O aumento da temperatura e a redução de pressão parcial de CO favorecem a redução do Mn, diminuindo as perdas na escória.

O processamento de ferroligas de manganês em fornos elétricos a arco submerso divide-se em dois métodos principais, definidos pela basicidade final da escória. O método de descarte de escória opera em estágio único, alcançando uma recuperação de cerca de 80%, neste caso, a escória é imediatamente descartada com

teores entre 15% e 20% de MnO, uma vez que a extração adicional desse resíduo não é economicamente viável. Em contrapartida, no método duplex, a escória gerada na primeira etapa é rica em manganês (30% a 50% de MnO) e não é descartada, sendo utilizada como matéria-prima em um segundo estágio para a produção de silicomanganês. O descarte ocorre apenas ao final desse reprocessamento, quando o teor residual de MnO é reduzido a aproximadamente 5%, elevando a recuperação global do metal para a faixa de 85% a 90% (TANGSTAD, 2013).

A complexidade química da escória e o impacto de óxidos não facilmente reduzidos ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CaO, MgO) no equilíbrio metal-escória reforçam a necessidade de um controle rigoroso da carga. Nesse sentido, o reaproveitamento de finos de minério (gerados no manuseio e beneficiamento), por meio do processo de briquetagem, surge como uma estratégia essencial. A utilização de briquetes com propriedades adequadas garante a estabilidade química necessária para esses equilíbrios e mantém a permeabilidade do leito do forno, evitando problemas operacionais (DING e OLSEN, 1996; DE JESUS, 2020).

### 3.4 Briquetagem

A briquetagem é um dos pilares da aglomeração na indústria mineral contemporânea. Tecnicamente, define-se aglomeração como a operação unitária que transforma materiais de granulometria fina (muitas vezes considerados resíduos ou subprodutos) em corpos ou fragmentos coesos através da consolidação de suas partículas por mecanismos físicos e químicos. No contexto metalúrgico, a briquetagem cumpre a função vital de conferir tamanho, forma e resistência mecânica adequados para que o material possa ser processado em fornos, garantindo a permeabilidade do leito e a eficiência das trocas gasosas. (CARVALHO *et al.*, 2018)

A indústria mineiro-metalúrgica utiliza primordialmente três processos de aglomeração: sinterização, pelotização e briquetagem (Figura 4) (TRAJANO, 1966). Enquanto a pelotização ocorre de forma "natural" por tamboramento (sem pressão externa intencional) e a sinterização depende da fusão parcial das superfícies em altas temperaturas, a briquetagem baseia-se na compressão mecânica forçada (CARVALHO *et al.*, 2018).

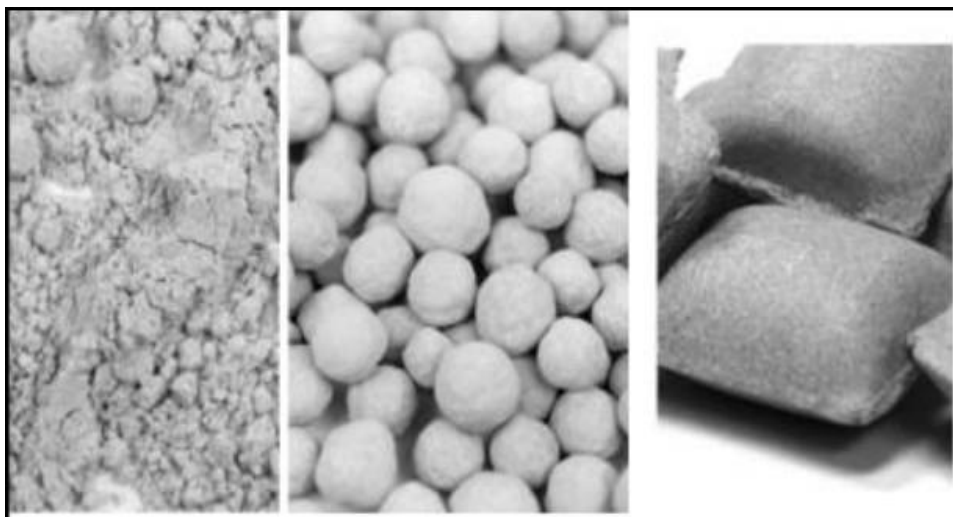


Figura 4: Comparativo entre produtos aglomerados de granulometria fina, destacando as morfologias de sínteres, pelotas e briquetes respectivamente.

Fonte: *FEECO INTERNATIONAL* (2018).

Para o setor de ferroligas de manganês, a briquetagem apresenta vantagens estratégicas que a tornam superior às demais rotas:

- **Versatilidade Granulométrica:** O conceito de "fino" é relativo, se no carvão refere-se a partículas menores que 0,6 mm, no minério de ferro pode chegar a 20  $\mu\text{m}$ . A briquetagem é singular por aceitar uma distribuição granulométrica ampla, ao passo que a pelletização exige um controle rigoroso de *pellet feed* e moagem intensiva (CARVALHO *et al.*, 2018).
- **Processamento a Frio:** Diferente da sinterização, que consome volumes massivos de combustível para fundir a carga, a briquetagem é frequentemente realizada em temperatura ambiente. Isso elimina a necessidade de fornos de endurecimento térmico e moagem prévia. (OLSEN, TANGSTAD e LINDSTAD 2007; CARVALHO *et al.*, 2018; KHUDYAKOV *et al.* 2022).
- **Sustentabilidade e Logística:** Além dos benefícios térmicos, o processo permite a redução do volume do material, facilitando o transporte e armazenamento econômico de finos que, de outra forma, causariam perdas por arraste de poeira e poluição ambiental (DEMIRBA, 1998).

#### 3.4.1 Mecanismos de Ligação e a Física da Compactação

Segundo Albaro (2000b) a transição de um leito de pó para um sólido rígido é um fenômeno muito utilizado, sendo descrito pelo autor com uma sistematização que ocorre em três mecanismos e estágios sequenciais:

1. **Estágio I** (Rearranjo de Partículas): No início da aplicação da carga, as partículas deslizam e se reordenam para preencher os vazios intergranulares. A densidade aumenta apenas pela redução dos espaços livres entre os grãos, atingindo o máximo de empacotamento físico possível sem deformação.
2. **Estágio II** (Deformação Plástica e Fragmentação): Quando a pressão supera a pressão de fluência do material, as partículas começam a se deformar plasticamente ou a se quebrar (fragmentação), dependendo de sua dureza e ductilidade. É nesta fase que ocorre o esmagamento de grãos ociosos e a maior parte da consolidação do briquete, com o aumento massivo da área de contato entre as superfícies.
3. **Estágio III** (Densificação Intragranular): Na fase final, a porosidade intergranular é virtualmente eliminada. O aumento da densidade passa a ocorrer pela eliminação dos poros dentro dos próprios grânulos (porosidade intragranular), o deslizamento de partículas resulta em uma microestrutura homogênea onde as interfaces originais tornam-se imperceptíveis (BARBOSA, 2021).

Os mecanismos estão representados na Figura 5.

A estabilidade desse corpo denso é mantida por um equilíbrio de forças interparticulares, inicialmente, as forças de Van der Waals e eletrostáticas atuam nas distâncias moleculares entre as faces das partículas (CLARKE E MARSH 1989; DUBOS *et al.* 2021). A presença de umidade cria pontes capilares que utilizam a tensão superficial para manter a coesão. Por fim, a introdução de aglomerantes assegura que as partículas mais finas fiquem aderidas à superfície das maiores, prevenindo a segregação e conferindo a resistência final necessária para suportar os esforços de queda e compressão no forno. (PIETSCH, 2002; EISELE; KAWATRA, 2003; DUBOS *et al.*, 2021).

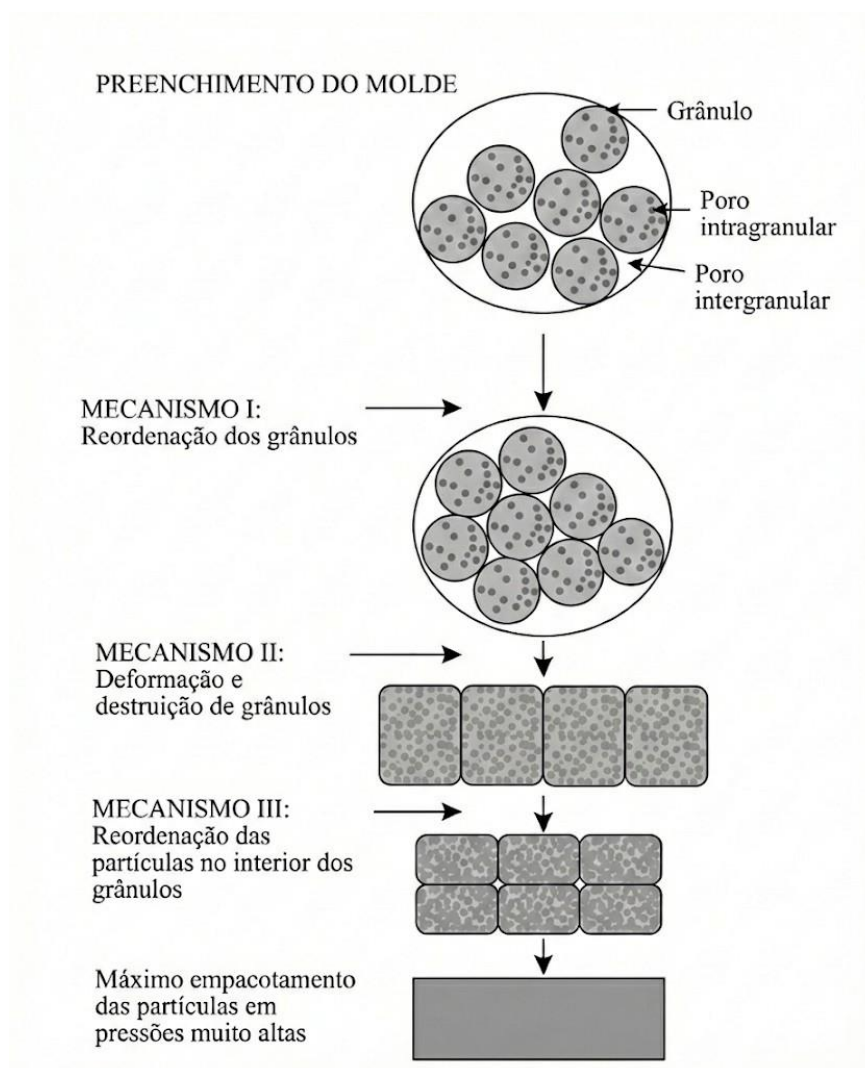


Figura 5: Mecanismos de compactação.

Fonte: Adaptado de Albaro (2000b).

### 3.4.2 Etapas do Fluxo Industrial e Tratamento de Cura

O sucesso da produção de briquetes depende da execução rigorosa de quatro etapas clássicas, onde a negligência em qualquer uma delas compromete a integridade do aglomerado (DE JESUS, 2020):

- **Preparação da Carga:** Envolve o ajuste granulométrico e de umidade. De Jesus (2020) ressalta que a área superficial das partículas é o fator determinante para a dosagem do ligante, quanto mais finas as partículas, maior

a superfície específica e maior a quantidade de aglomerante necessária para o recobrimento total.

- **Mistura e Homogeneização:** Esta etapa é fundamental para assegurar a uniformidade química do aglomerado e a distribuição equitativa do ligante sobre todas as partículas. O sucesso da operação depende do ajuste preciso do tempo de residência no homogeneizador, ele deve ser suficiente para garantir o recobrimento completo das superfícies, sem estender-se desnecessariamente, o que otimiza a eficiência do fluxo produtivo (DE JESUS, 2020).
- **Compactação (Prensagem):** O objetivo central é maximizar a densidade do briquete ao reduzir o espaço vazio entre os grãos. Ao minimizar a distância interparticular dentro da cavidade de moldagem, as forças intermoleculares de coesão são potencializadas, transformando o leito de finos em um corpo sólido e resistente (DE JESUS, 2020).
- **Cura e Tratamento Térmico:** Este processo de cura é essencial para evitar o colapso dos aglomerados durante o manuseio e carregamento no forno, onde o briquete deverá resistir ao peso da coluna de carga e às altas temperaturas iniciais (DE JESUS, 2020). A etapa de tratamento térmico pode ser integrada a outras fases do fluxo produtivo de forma simultânea, quando o aporte térmico ocorre durante o condicionamento da mistura ou no ato da prensagem, o processo é definido como briquetagem a quente (TANAKA, 2014). Segundo Kurunov e Bizhanov (2018), essa modalidade facilita a moldagem ao reduzir a pressão de compactação necessária, além de elevar a resistência estrutural do aglomerado, entretanto, o elevado consumo de energia para o aquecimento impacta a viabilidade financeira do processo, conferindo à briquetagem a frio uma vantagem econômica estratégica pela eliminação desses custos térmicos operacionais.

### 3.5 Avaliação da qualidade dos briquetes

A definição de qualidade para um aglomerado mineral não se limita à análise de um parâmetro isolado, sendo caracterizada pela capacidade do produto de preservar sua integridade física e estrutural durante todo o seu ciclo logístico e operacional, a eficácia do processo de aglomeração é validada por um conjunto de

propriedades físicas interdependentes (como resistência à compressão, ao impacto, à abrasão e à água) que asseguram a durabilidade da união entre as partículas frente aos esforços externos encontrados desde a saída da prensa até o carregamento final no forno. (RICHARDS, 1990).

### 3.5.1 Resistência à Compressão

Segundo Thoms, *et al.* (1999) a resistência à compressão é definida como a carga máxima de esforços compressivos que o briquete suporta antes de sofrer ruptura, este parâmetro é fundamental para garantir a estabilidade do material durante as etapas de armazenamento e transporte, simulando as cargas experimentadas pelo aglomerado no fundo de silos de alimentação ou sob o peso de pilhas de estocagem. Thoms *et al.* (1999), sugerem que o valor mínimo aceitável para assegurar essa integridade é de 0,35 MPa.

### 3.5.2 Resistência ao Impacto

A resistência ao impacto avalia a resposta do aglomerado a cargas dinâmicas ou choques bruscos, este ensaio reproduz as condições reais de movimentação em superfícies inclinadas (chutes), transferências entre correias transportadoras e o carregamento de vagões ou moegas. A norma de aceitação para o impacto deve considerar a severidade logística, ou seja, o número de vezes que o material será transferido antes de ser alimentado no forno (ELISHEVICH, 1972; KOZHEVNIKOV e RAVICH, 1991).

A quantificação desta propriedade é feita pelo número de quedas consecutivas suportadas e pela medição da perda de massa na forma de finos. Barbosa (2021) estabelece que a geração de partículas menores que 3,3 mm em valores superiores a 10% classifica o briquete como de qualidade inadequada. Para o manuseio industrial seguro, espera-se que briquetes curados suportem ao menos três quedas consecutivas, valor que pode subir para dez quedas em materiais que receberam tratamento térmico (CASTELÕES e CAMPOS, 1994; BY, 2017; CARVALHO *et al.*, 2018).

### 3.5.3 Resistência à Abrasão

A resistência à abrasão refere-se à avaliação da degradação granulométrica a frio causada pelo atrito entre os aglomerados ou entre estes e as paredes dos equipamentos de transporte, diferente do impacto, a abrasão promove um desgaste periférico contínuo que resulta na geração de poeira, briquetes que apresentam perda de massa inferior a 5% em testes de desgaste superficial são classificados como excelentes (CARVALHO *et al.*, 2018).

#### 3.5.4 Absorção de Água

A estabilidade frente à umidade é um fator limitante para a viabilidade de estocagem ao ar livre, a exposição à chuva ou alta umidade relativa pode enfraquecer as ligações interparticulares por meio da solubilização de aglomerantes hidrofílicos, como por exemplo o amido, resultando na perda de resistência e durabilidade. (THOMAS *et al.* 1998; KALIYAN e MOREY, 2008).

Cheloni *et al.* (2024) evidenciaram como a escolha do aglomerante define a durabilidade do briquete frente a umidade, ao observarem que briquetes produzidos exclusivamente com bentonita sofrem inchamento e desintegração total em poucos minutos de contato com a água, em contrapartida, sistemas baseados em cal hidratada e melação demonstram maior resistência à água do que o próprio minério granulado natural, indicando que a absorção de água é um parâmetro decisivo para a definição da estratégia logística.

#### 3.5.5 Densidade Aparente

A densidade aparente, definida pela relação direta entre a massa e o volume ocupado, é um indicador direto do grau de agregação das partículas, quanto maior a densidade, maior tende a ser a resistência mecânica do produto final, o que favorece a logística de estocagem e transporte ao reduzir perdas de material e aproveitar melhor o espaço físico (BHATTACHARYA *et al.*, 1989). Do ponto de vista econômico, o aumento da densidade permite a movimentação de uma carga mássica superior por unidade de volume, além de favorecer a produtividade volumétrica dos fornos, desde que mantida a porosidade necessária para a cinética de redução (BHATTACHARYA *et al.*, 1989; SAH e DUTTA, 2010; De Jesus, 2020).

### 3.5.6 Crepitação

A crepitação é a desintegração catastrófica de partículas ou aglomerados sob choque térmico, ocorrendo principalmente na zona de pré-redução do forno elétrico (FARIA, 2008). No caso de briquetes de manganês, esse fenômeno é governado por dois mecanismos principais:

- **Pressão de Vapor:** O aquecimento súbito vaporiza a umidade livre e a água constitucional (ex: manganita), gerando pressões internas que rompem a estrutura. A umidade elevada pode aumentar o índice de crepitação em até 40% (FARIA *et al.*, 2012).
- **Transformações de Fase:** A decomposição térmica dos óxidos (ex:  $\text{MnO}_2 \rightarrow \text{Mn}_2\text{O}_3$ ) gera mudanças de volume e tensões internas que propagam trincas (FARIA *et al.*, 2012).

Diferente do minério bruto, a estabilidade do briquete depende do ligante, aglomerantes orgânicos, sofrem decomposição em altas temperaturas, o que compromete a estabilidade térmica e fragiliza o aglomerado antes do início do processo de sinterização, resultando em maiores índices de crepitação. Por outro lado, ligantes inorgânicos demonstram um desempenho metalúrgico superior, mantendo melhor a integridade física e estrutural do material independentemente do tipo de minério de manganês (CHELONI *et al.*, 2025; DUBOS *et al.*, 2021).

A crepitação reverte o briquete ao estado de finos, o que obstrui a passagem de gases e gera canais preferenciais, isso reduz a eficiência térmica e química do forno e, em casos críticos, pode causar explosões violentas devido ao acúmulo de gases sob pressão e à evaporação súbita de carga úmida em zonas de alta temperatura. (FARIA, 2008; DE JESUS, 2020). Classificam-se como tendo boa resistência ao choque térmico os briquetes que apresentam um índice de crepitação igual ou inferior a 3% (CARVALHO, 2014).

### **3.6 Panorama dos parâmetros de briquetagem de finos de manganês e resíduos industriais metalúrgicos**

Para assegurar a resistência mecânica adequada e evitar a geração precoce de finos, diversos autores têm concentrado esforços nos estudos de variáveis críticas de controle do processo, investigando especificamente a influência da pressão de compactação, do tempo de cura e da dosagem e tipo de aglomerantes. Essas pesquisas têm explorado diferentes combinações de matrizes minerais incluindo finos oxidados, silicatados e resíduos industriais para determinar as condições experimentais que maximizem o desempenho físico dos briquetes. A Tabela 4 resume pesquisas realizadas sobre o tema, apresentando as matérias-primas, os sistemas de aglomeração e os parâmetros operacionais adotados para garantir a qualidade dos aglomerados.

Tabela 4: Visão geral de estudos de briquetagem de finos de minério de manganês e outros resíduos do processo de ferro-ligas de manganês

MATÉRIAS-PRIMAS	AGLOMERANTES	TEMPO DE CURA	PRESSÃO (MPa)	REFERÊNCIAS
Finos de minério oxidado (Urucum) + finos de coque	Melaço ou Bentonita	7 dias	100	De Jesus e Tangstad (2021)
Finos de Mn + pós de despoeiramento + finos de liga	Orgânico	2-4 dias	Não informado	Diaz <i>et al.</i> (2021)
Finos de minério oxidado + lamas de Mn + pós metálicos	Cal + Melaço / Bentonita	1-2 dias	14	By (2017)
Concentrado de Mn + pó de despoeiramento + coque breeze	Cimento Portland (5%)	30 dias	Não informado	Bizhanov <i>et al.</i> (2014)
Finos de minério indiano de baixo teor	Melaço, Cimento e Bentonita	Não informado	Não informado	Singh <i>et al.</i> (2011)
Finos de minério (silicatado) + pó de FeMn + carvão vegetal	Bentonita (12,71%)	11 dias	67,55	Cheloni, Lopes e Reis (2023)
	Amido pré-gelatinizado (8,07%)	19,51 dias	67,52	
	Cal hidratada + Melaço (15%)	23,27 dias	27,09	
Finos de minério oxidado + pó de FeMn + carvão vegetal	Bentonita (11,5%)	11 dias	52,5	Cheloni, Cota e Reis (2024)
	Cal hidratada + Melaço (16,2%)	24 dias	62,12	
Finos de Mn (Misto) + pó de metal + finos de carvão	Bentonita / Amido / Cal + Melaço	11 a 24 dias	27,09 a 67,55	Cheloni <i>et al.</i> (2025)
Produto fino + rejeito de minério de Mn	Cimento Portland (5% e 10%)	7 e 28 dias	20 e 25	Barbosa (2021)

Fonte: Adaptado de Cheloni (2023).

## 4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os métodos experimentais utilizados no desenvolvimento do trabalho.

### 4.1 Preparação das matérias-primas e elaboração dos briquetes

As matérias-primas utilizadas neste trabalho foram finos de minério de manganês da região Norte do Brasil, pó de despoeiramento provenientes da britagem da liga FeSiMn e moinha de carvão vegetal.

Um fator de diferenciação para este estudo reside na natureza mineralógica desses finos. Diferentemente dos resíduos gerados no quadrilátero ferrífero de Minas Gerais, que são ricos em silicatos (como por exemplo a espessartita:  $Mn_3Al_2(SiO_4)_3$ ), os finos da região Norte são predominantemente oxidados. Sua composição mineralógica é caracterizada pela presença de criptomelana ( $(K,Ba)Mn_8O_{16} \cdot xH_2O$ ), todorokita ( $(Ca,Na,K)(Mn^{2+}Mn^{4+})_6O_{12} \cdot xH_2O$ ) e pirolusita ( $MnO_2$ ) (CHETTY e GUTZMER, 2018; CHERAGHI *et al.*, 2019; CHELONI *et al.*, 2024; CHELONI *et al.*, 2025).

A metodologia deste trabalho é apresentada sequencialmente por meio do fluxograma apresentado na Figura 6, que ilustra as etapas gerais do processo de briquetagem, abrangendo desde a preparação e homogeneização das matérias-primas até a fase de ensaios de qualidade, além de sistematizar os procedimentos específicos de produção, que compreendem a preparação dos moldes, a adição de aglomerantes (Componente inorgânico e sistema orgânico/inorgânico), a prensagem de compactação a 60 MPa, a desmoldagem e, por fim, o período de cura de 14 dias dos briquetes que é essencial para garantir sua integridade antes dos ensaios físicos.

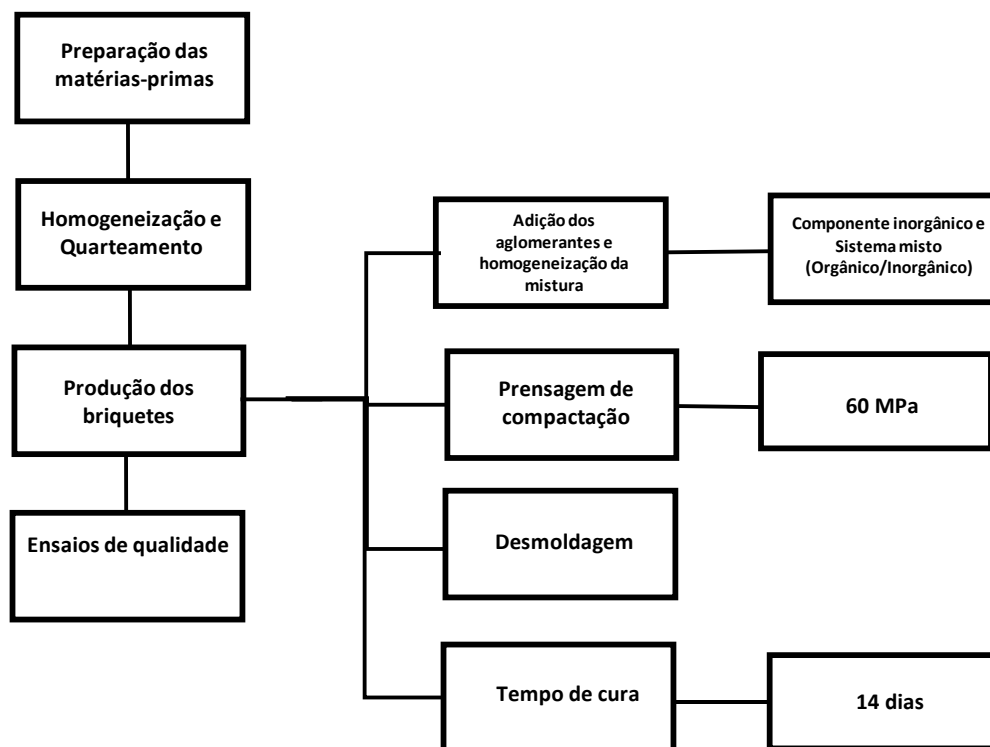


Figura 6: Fluxograma das etapas gerais do processo de briquetagem e confecção dos briquetes.

Inicialmente, os materiais foram homogeneizados e quarteados utilizando, o quarteador carrossel, o método da pilha cônica, o método da pilha alongada e o quarteador tipo Jones pertencente ao Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (DEMIN – UFOP), sendo representados os métodos por meio das Figuras 7,8 e 9.



Figura 7: Quateador Carrossel.

Fonte: Autor (2025).



Figura 8: Quateador Jones.

Fonte: Autor (2025).



Figura 9: Pilha tipo Alongada (A); Pilha do tipo cônica (B).

Fonte: Autor (2025).

As formulações dos briquetes incluíram misturas de aglomerantes, como o componente inorgânico e um sistema misto de aglomerantes orgânico/inorgânico, em diferentes proporções, conforme descrito na Tabela 5. A caracterização das matérias-primas foi realizada previamente por Cheloni et al. (2023) e Cheloni et al. (2024), e estão apresentadas nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 5: Proporção dos aglomerantes no briquetes.

<b>Aglomerantes Proporções(%)</b>			
	A	B	C
Orgânico/Inorgânico	7,5	10	12
Componente inorgânico	7,5	5	3

Tabela 6: Caracterização de matérias-primas utilizadas na preparação dos briquetes.

Propiedades	Fino de manganês	Fino do britador
Densidade específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,8151	4.8320
Superfície específica (m <sup>2</sup> /g)	14,992	2.181
D90 (mm)	5,2	0.043
D50 (mm)	0,55	0.017
Composição mineralógica	Criptomelana, Todorokita, Pirolusita, Braunita, Jacobita, Rutilo, Hematita, Quartzo, Caulinita	Quartzo, Hausmanita, Rodonita, FeSiMn Ferro-silício-manganês, Alumínio-manganês, Carbetto de silício manganês, Óxido de magnésio, alumínio e manganês com estrutura espinélio

n.d.: não detectado.

Tabela 7: Composição química de finos oxidados de manganês.

Mn (%)	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	K <sub>2</sub> O (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	BaO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	PPC* (%)
33,1	4,4	20,0	10,7	1,12	0,33	2,09	0,48	0,14	1,8	0,15	12,57

PPC\*: Perda por Calcinação.

Inicialmente, as matérias-primas secas foram homogeneizadas em misturador planetário por 2 minutos. Em seguida, foram incorporadas as misturas de

aglomerantes, distribuídas uniformemente, e, por fim, adicionou-se água para ajuste da umidade (Figuras 10 e 11). Os teores de umidade foram mantidos entre 8% e 10%, faixa considerada crítica para a trabalhabilidade e moldabilidade da mistura (EISELE e KAWATRA, 2003; DE GISI *et al.*, 2019).

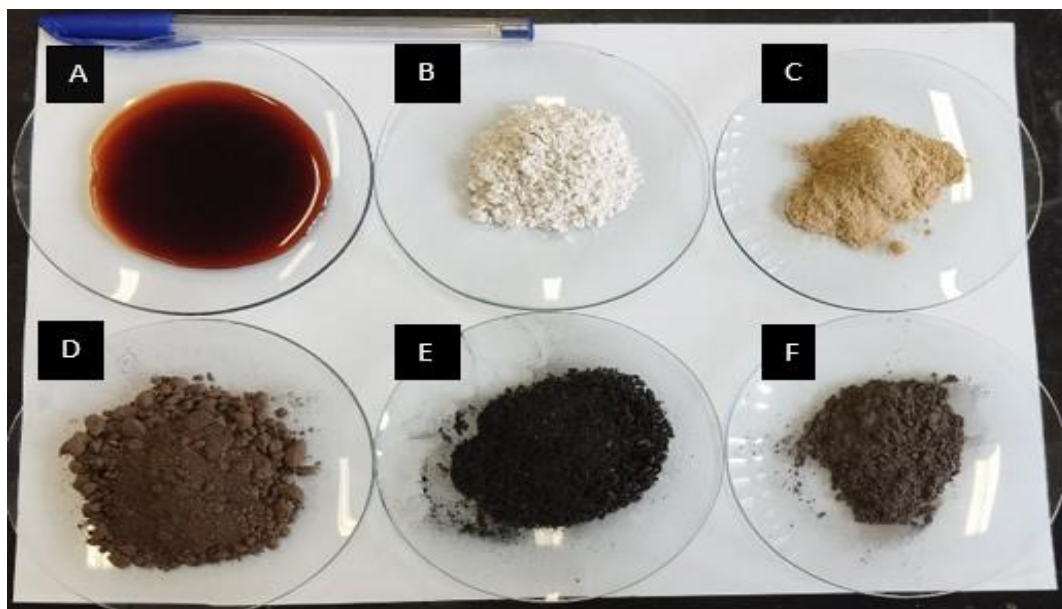


Figura 10: Matérias primas (A e B: Orgânico/Inorgânico; C: Componente inorgânico; D: Fino de Manganês; E: Carvão vegetal; F: Pó da liga metálica).

Fonte: Autor (2025).



Figura 11: Homogeneização dos finos de manganês e aglomerantes antes do processo de compactação.

Fonte: Autor (2025).

As misturas foram então compactadas por prensagem uniaxial em molde cilíndrico de aço (30 mm x 30 mm) (Figura 12), utilizando prensa hidráulica (Solocap, modelo CI – 100 toneladas-força), com aplicação de força de 42 kN, conforme condição otimizada por Cheloni *et al.* (2024). Para facilitar a desmoldagem, foi aplicada vaselina nas paredes internas do molde. A cura dos briquetes foi realizada em temperatura ambiente por 14 dias no Laboratório de Materiais Cerâmicos (DEMIN –UFOP).



Figura 12: Molde utilizado na fabricação dos briquetes.

Fonte: Autor (2025).

## 4.2 Ensaios para a avaliação da qualidade dos briquetes

Todas as composições de briquetes foram submetidas a ensaios de resistência padronizados, com o objetivo de avaliar a qualidade dos aglomerados sendo os testes realizados em triplicata.

### 4.2.1 Resistência ao impacto

A resistência ao impacto dos briquetes foi avaliada por meio de ensaios de queda livre, conforme a norma ASTM D440-07 (2019). Os briquetes foram soltos de uma altura de 1,8 m sobre uma placa metálica de 10 mm de espessura, utilizada como anteparo, conforme ilustrado na Figura 13. Os testes foram realizados no Laboratório de Materiais Cerâmicos (DEMIN/UFOP). A resistência foi determinada com base na massa passante por uma peneira de 3,35 mm, sendo o índice calculado conforme a Equação 2.

$$IQ = \frac{m_1}{m} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

$IQ$  = índice de resistência à queda (%);

$m_1$  = massa do material retido na peneira de 3,35mm, após as duas quedas (g);

$m$  = massa do briquete (g).

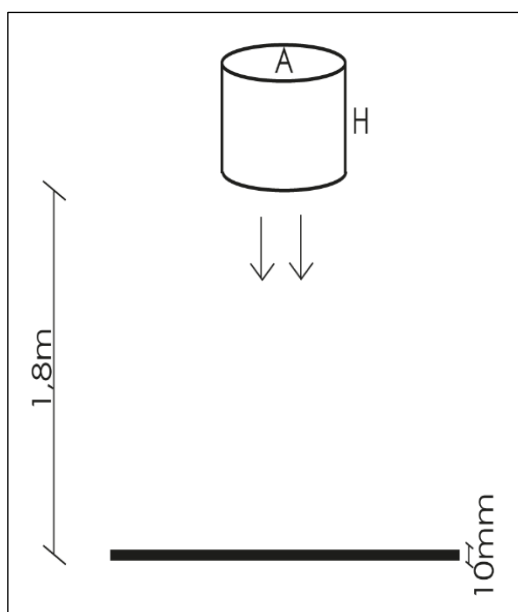


Figura 13: Representação esquemática do ensaio de resistência ao impacto.

#### 4.2.2 Resistência à abrasão

A resistência à abrasão dos briquetes foi avaliada com base na norma ASTM E279-18, com adaptações. Os testes foram realizados no Laboratório de Mecânica das Rochas (DEMIN/UFOP) e simulam a degradação durante o transporte e manuseio. Cada briquete foi inserido em um tambor rotativo com 150 mm de diâmetro

interno, 100 mm de comprimento e duas aletas internas, operando a 20 rpm por 10 minutos (200 rotações). Após o ensaio, o material foi peneirado em malha de 6,3 mm para determinação do índice de tamboramento, calculado conforme a Equação 3.

$$IT = \frac{m_1}{m_0} \times 100 \quad (3)$$

Em que:

$IT$  = índice de tamboramento, expresso em percentagem (%);

$m_0$  = massa total da porção teste (g);

$m_1$  = massa da porção teste retida na peneira de 6,3 mm (g).

#### 4.2.3 Absorção de água

A absorção de água pelos briquetes foi avaliada com base na norma brasileira NBR 9778 (2009), com adaptações. O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos (DEMIN/UFOP) e teve como objetivo verificar a capacidade dos briquetes de absorver água e manter sua integridade após a cura. Inicialmente, os corpos de prova secos foram pesados ( $M_s$ ) e, em seguida, imersos em água fria por 30 minutos. Ao final do tempo de imersão, os briquetes íntegros foram secos superficialmente e pesados novamente ( $M_{sat}$ ). A porcentagem de absorção de água foi calculada conforme a Equação 4.

$$AA = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (4)$$

Em que:

$AA$  = absorção de água (%);

$M_{sat}$  = massa úmida (g);

$M_s$  = massa seca (g).

#### 4.2.4 Resistência à compressão

A resistência à compressão dos briquetes foi determinada por meio de ensaios de compressão uniaxial, realizados com o equipamento *Point Load Tester* (modelo PLT-100) da *Geotechnical Consulting and Testing Systems* (GCTS), localizado no Laboratório de Mecânica das Rochas do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (DEMIN/UFOP). O teste consistiu na aplicação de carga vertical entre dois pratos de aço (superior e inferior), até o início do processo de ruptura do briquete. A metodologia adotada seguiu os princípios da norma ASTM C170. Uma representação esquemática do ensaio é apresentada na Figura 14.

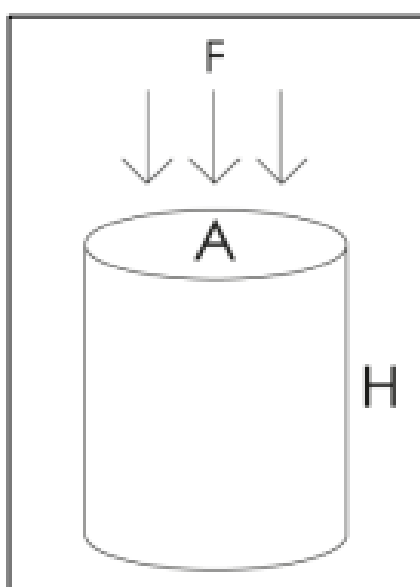


Figura 14: Esquema do ensaio de compressão.

A força máxima registrada no momento da fratura foi utilizada para o cálculo da resistência à compressão, conforme demonstrado na Equação 5.

$$R_c = \frac{F}{A} \quad (5)$$

Em que:

$R_c$  = resistência à compressão (MPa);

$F$  = força máxima atingida no momento de ruptura do corpo de prova (KN);

$A$  = área do briquete submetida à força da prensa (cm<sup>2</sup>).

#### 4.2.5 Ensaio de Crepitação

Devido à escassez de normatizações específicas para a avaliação da crepitação em aglomerados de manganês, o procedimento experimental foi executado com adaptação da norma ISO 8371, de acordo com Faria (2011) e Carvalho (2014).

Para a execução dos testes, os briquetes foram selecionados após o respectivo período de cura, mantendo-se a sua umidade natural. Para cada condição (A, B e C), foram utilizados 12 briquetes, divididos em triplicatas de 4 unidades cada. As amostras foram acondicionadas em recipientes de aço inoxidável e o tratamento térmico foi conduzido em forno elétrico (modelo *Elektro Linn High Term CC405*), seguindo os parâmetros operacionais abaixo:

- Taxa de aquecimento: 5 °C/min;
- Temperatura final: 700 °C;
- Tempo de ensaio: 30 minutos em temperatura constante;
- Atmosfera: Ambiente (não controlada).

Após o resfriamento natural, a massa total de cada grupo de 4 briquetes foi aferida. Na sequência, o material foi submetido ao peneiramento em malha de 6,3 mm. Esta malha foi adotada como ponto de controle por representar o limite entre o material granulado e a geração de finos que podem comprometer a permeabilidade do leito de carga no forno. O Índice de Crepitação (DI) foi determinado pela relação percentual entre a massa de finos gerados e a massa total da amostra após o tratamento, conforme a Equação 6.

$$DI_{6,3} = \frac{M_{passante}}{M_{total}} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

$DI_{6,3}$  = Índice de crepitação para a peneira de 6,3 mm (%);

$M_{passante}$  = Massa total dos briquetes de cada teste após o processamento térmico (g);

$M_{total}$  = Massa da fração passante na peneira de 6,3 mm (g).

Para fins de classificação de qualidade, adotou-se o critério estabelecido por Carvalho (2014), que define briquetes com  $DI < 3\%$  como materiais de excelente desempenho térmico.

#### 4.2.6 Densidade Aparente

A densidade aparente dos briquetes foi determinada por meio da razão entre a massa e o volume geométrico de cada amostra. A massa foi obtida com auxílio de uma balança de precisão, enquanto o volume foi calculado considerando as dimensões dos briquetes (diâmetro e altura), assumindo a forma cilíndrica dos corpos de prova.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos no trabalho.

### 5.1 Briquetes

A Figura 15 apresenta um briquete obtido a partir da fabricação em laboratório. Os corpos de prova apresentaram formato cilíndrico regular e bom grau de compactação, características que indicam a eficiência do processo de moldagem e prensagem adotado. Os briquetes mantiveram integridade estrutural adequada para a realização dos ensaios físicos, demonstrando coesão suficiente para suportar os procedimentos experimentais subsequentes.

As amostras não apresentaram diferenças visuais significantes perceptíveis entre si no que se refere à coloração nas diferentes condições testadas. A condição C apresentou a maior densidade média aparente, seguida pelas condições B e A sendo os valores das densidades apresentados na tabela 8. Esse comportamento pode estar relacionado à maior proporção do sistema de aglomerantes orgânico/inorgânico (12%) e ao menor teor de componente inorgânico (3%), o que favorece maior compactação das partículas, resultando em uma estrutura mais densa.

Tabela 8: Densidade Média Aparente de cada condição.

Condição	Densidade Média Aparente (g/cm <sup>3</sup> )
A	2,1199
B	2,1352
C	2,1486



Figura 15: Briquete antes dos ensaios (Condição A).

## 5.2 Resistência ao impacto

A Figura 16 mostra os resultados obtidos nos testes de resistência ao impacto realizados nas composições testadas, juntamente com desvio padrão encontrado.

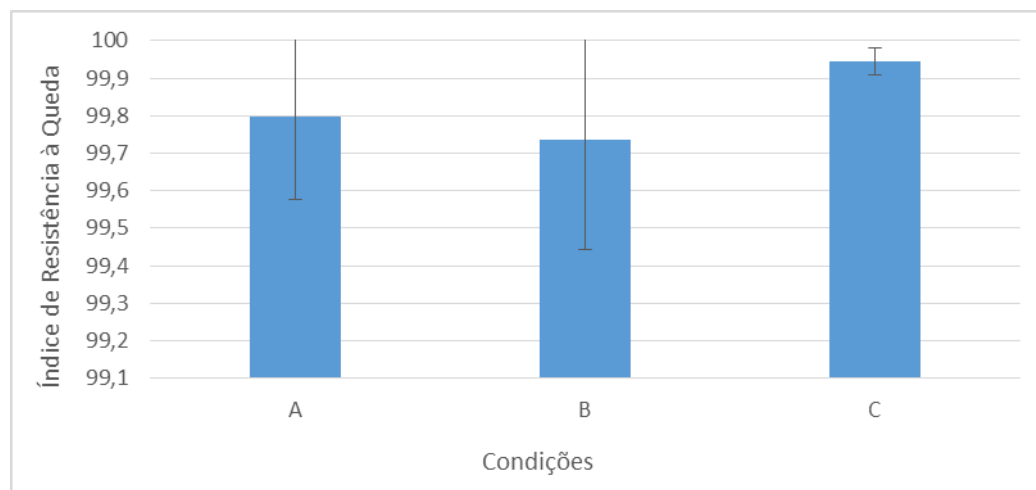


Figura 16: Resultados dos ensaios de resistência ao impacto.

Quanto maior o índice de resistência, menor foi a quantidade de material fragmentado após a queda livre sobre o anteparo metálico a partir de 1,8 metros de altura. Todas as composições apresentaram índices de resistência ao impacto superiores a 99%, indicando excelente desempenho mecânico frente a esforços de choque. A condição C obteve o melhor resultado médio (99,94%), além do menor desvio padrão (0,04%), evidenciando elevada resistência e uniformidade entre os corpos de prova. A condição A apresentou resistência média de 99,80%, ligeiramente inferior à condição C, mas ainda com bom desempenho e um desvio padrão de 0,22%. A condição B, por sua vez, apresentou o menor valor médio entre as formulações (99,74%), associado ao maior desvio padrão (0,29%), o que sugere uma maior instabilidade no desempenho mecânico dos briquetes dessa condição, possivelmente relacionada a uma menor uniformidade da estrutura interna.

Os índices de resistência ao impacto obtidos neste estudo (entre 99,74% e 99,94%) demonstram um elevado desempenho mecânico quando confrontados com trabalhos encontrados na literatura. Ao analisar os dados de Barbosa (2021), que reportou valores de resistência ao impacto variando de 86,45% a 99,08% para briquetes aglomerados com cimento Portland, observa-se que as formulações deste trabalho proporcionaram uma integridade física ligeiramente superior, mesmo quando comparadas às condições otimizadas da autora, que alcançaram 98,97% (BMC1). Esse resultado indica que o sistema de aglutinação misto (inorgânico, orgânico/inorgânico) foi eficaz na absorção de energia de impacto, superando em estabilidade a matriz rígida de cimento utilizada no estudo comparativo.

Em relação às pesquisas de Cheloni *et al.* (2023) e Cheloni *et al.* (2024), os resultados aqui obtidos alinham-se com o alto desempenho reportado pelos autores. Em seus estudos com minérios silicatados e oxidados, os briquetes apresentaram valores de resistência à quebra superiores a 98,0%, independentemente do aglutinante utilizado. A Condição C deste trabalho, com 99,94% de resistência, destaca-se por atingir níveis de integridade quase total, superando ligeiramente a média observada na literatura. A estabilidade de todas as condições corroboram com as observações de Sah e Dutta (2010) e Halt e Kawatra (2014) para o sistema orgânico/inorgânico, que segundo os autores, esse sistema forma uma matriz química onde resulta em um aglomerado extremamente resiliente a esforços dinâmicos.

### 5.3 Resistência à abrasão

A Figura 17 mostra os resultados obtidos nos testes de resistência à abrasão realizados nas três formulações testadas, juntamente com os respectivos desvios padrão.

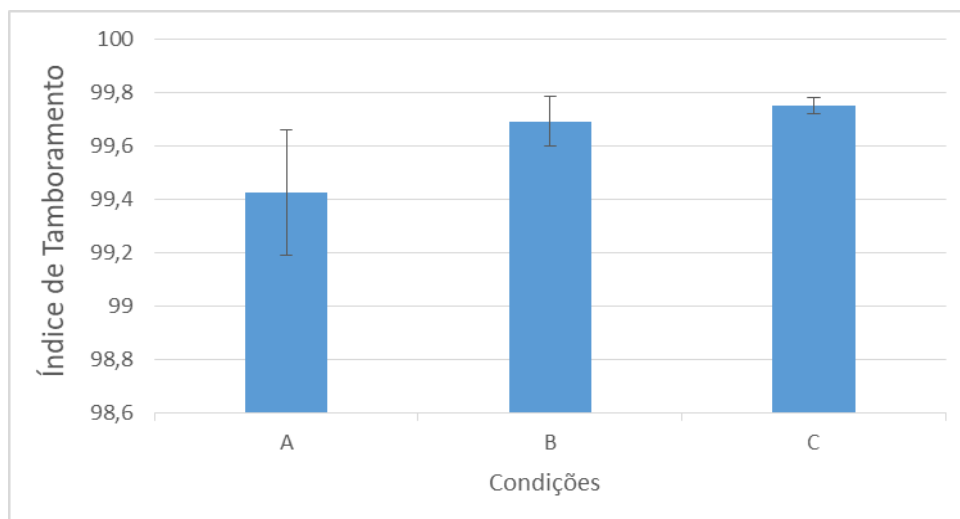


Figura 17: Resultados dos ensaios de resistência à abrasão

Todas as composições apresentaram valores de resistência à abrasão bastante elevados e semelhantes entre si, com índices superiores a 99%, evidenciando a elevada integridade superficial dos briquetes produzidos. A condição A apresentou uma resistência à abrasão ligeiramente menor que as demais, com média de 99,43%, além de ter o maior desvio padrão (0,24%), indicando maior variação entre as réplicas. As condições B e C alcançaram médias superiores a 99,69%, com destaque para a condição C, que obteve o maior valor médio (99,75%)

e o menor desvio padrão (0,03%), demonstrando maior uniformidade no desempenho dos briquetes frente à ação abrasiva.

Ao confrontar esses dados com os resultados apresentados por Barbosa (2021), que utilizou cimento Portland como aglomerante, observa-se que as formulações deste trabalho apresentaram um desempenho significativamente superior. Nas condições otimizadas da autora (BMC1), a perda de massa por abrasão foi de 13,21%, resultando em uma resistência de apenas 86,79%. Em contraste, mesmo a formulação de menor desempenho deste estudo (Condição A) manteve uma integridade de 99,43%. Esse distanciamento expressivo ratifica que a combinação de componente inorgânico com o complexo orgânico/inorgânico promoveu uma coesão superficial muito mais eficaz do que a matriz de cimento utilizada no estudo comparativo.

Em relação às investigações de Cheloni *et al.* (2023) e Cheloni *et al.* (2024), os resultados mostram-se convergentes. Esses pesquisadores reportaram índices de resistência ao tamboramento geralmente situados na faixa de 98,0% a 99,8%. Notavelmente, em Cheloni *et al.* (2024), os briquetes de minério oxidado aglomerados com o sistema de aglomerantes orgânico/inorgânico atingiram valores próximos a 99,8%, superando os do componente inorgânico. A obtenção do valor médio de 99,75% na Condição C (condição com menor quantidade de fase inorgânica) deste trabalho valida essa tendência, além de confirmar que a natureza do minério oxidado do Norte como discutido por Cheloni *et al.* (2024) é caracterizado em partículas de morfologia mais esférica e porosa favorece a atuação do aglomerante em relação ao minério silicatado.

#### **5.4 Absorção de água**

A Figura 18 apresenta os resultados obtidos nos testes de absorção de água para as três condições formuladas e o desvio padrão associado.

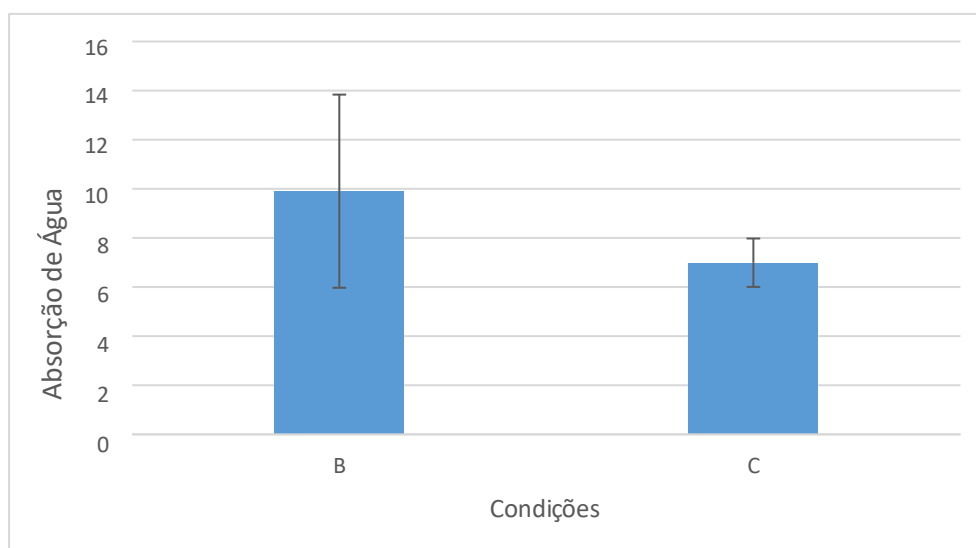


Figura 18: Resultados dos ensaios de resistência à absorção de água.

Observa-se que os briquetes da condição A não resistiram ao ensaio, apresentando desintegração completa durante a imersão. Esse resultado demonstra baixa resistência à umidade e inviabiliza o uso dessa formulação em contextos que envolvam exposição à água. As condições B e C mantiveram sua integridade física ao longo do ensaio, com valores médios de absorção de 9,90% e 6,99%, respectivamente. A condição C apresentou o melhor desempenho, tanto em termos de menor absorção quanto de maior uniformidade entre as amostras, indicando uma estrutura interna mais coesa e menos suscetível à percolação de umidade.

A desintegração completa dos briquetes da Condição A durante o ensaio de imersão revela um comportamento crítico para a formulação com o maior teor do componente inorgânico (7,5%). Este resultado converge com as observações de Cheloni *et al.* (2024), que, ao analisarem briquetes de minério de manganês oxidado, relataram que as amostras aglomeradas com o mesmo aglomerante inorgânico se desintegraram nos primeiros minutos de contato com a água. Conforme discutido por esses pesquisadores e por Khudyakov *et al.* (2022), o componente inorgânico aplicado, embora confira resistência mecânica a seco, é suscetível à absorção de água e expansão entre a rede cristalina de argilominerais produzindo um efeito plastificante, o que compromete a integridade do aglomerado sob submersão e inviabiliza o armazenamento em pátios expostos a intempéries.

Ao confrontar os resultados das condições estáveis com o trabalho de Barbosa (2021), observa-se uma equivalência no desempenho técnico. Embora a autora tenha expressado seus resultados através do Índice de Resistência à Água (IRA), ela o

definiu matematicamente como o complemento da absorção ( $100 - \% \text{Absorção}$ ). A melhor condição obtida por Barbosa com cimento Portland apresentou um IRA de 93,07%, o que corresponde a uma absorção de água de 6,93%. A Condição C deste trabalho atingiu uma absorção média de 6,99%, demonstrando que o sistema orgânico/inorgânico foi capaz de promover uma impermeabilização tão eficiente quanto a matriz de cimento Portland, sem introduzir os contaminantes típicos do cimento (como silicatos e aluminatos em excesso). Esse desempenho superior da Condição C, com baixo desvio padrão (0,99%), sugere que a sinergia entre o minério oxidado e o aglomerante criou uma barreira eficaz contra a umidade.

### 5.5 Resistência à compressão

A Figura 19 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão uniaxial realizados para as três formulações de briquetes.

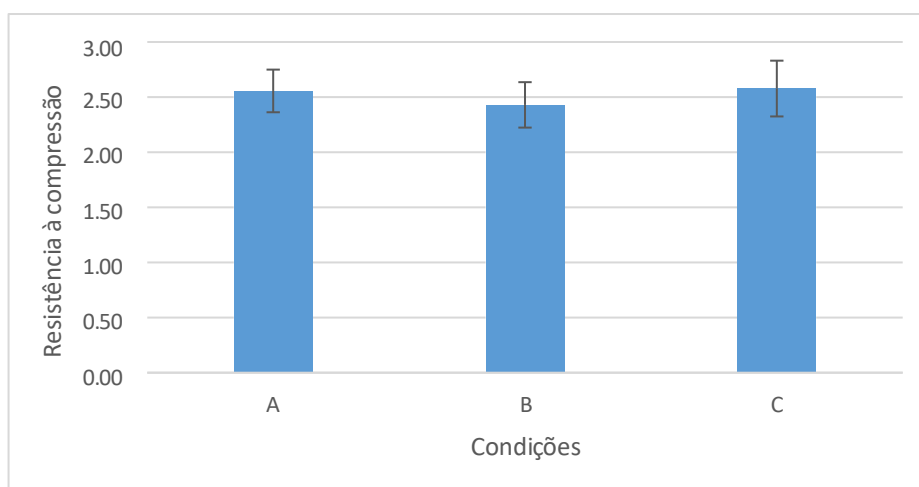


Figura 19: Resultados dos ensaios de resistência à compressão.

De modo geral, os valores médios de resistência à compressão variaram entre 2,43 e 2,58 MPa, com desvios padrão relativamente baixos, o que indica uma boa uniformidade entre os corpos de prova. A condição C apresentou o maior valor médio de resistência (2,58 MPa), seguida da condição A (2,56 MPa) e da condição B (2,43 MPa). A diferença entre os valores médios é sutil, mas o desempenho da condição C sugere maior capacidade de suportar esforços compressivos. No entanto, a condição B manteve o menor desvio padrão (0,21 MPa), demonstrando maior consistência

entre as amostras, enquanto a condição C apresentou o maior desvio (0,25 MPa), indicando uma leve variabilidade estrutural.

Ao confrontar esses dados com o limite mínimo de resistência aceitável para o manuseio industrial que é de 0,35 MPa segundo Thoms *et al.* (1999), observa-se que todas as formulações superam esse requisito em mais de seis vezes. Embora Barbosa (2021) tenha alcançado valores superiores, chegando a 6,41 MPa, deve-se considerar que aquela autora utilizou cimento Portland (10%), um aglomerante hidráulico que desenvolve fases cristalinas de silicato de cálcio hidratado de alta resistência, mas que introduz contaminantes indesejáveis à metalurgia (como álcalis e fósforo), ao contrário dos aglutinantes orgânicos e compostos utilizados neste trabalho.

A validade técnica dos resultados aqui obtidos é reforçada pela comparação direta com Cheloni *et al.* (2024), que trabalharam especificamente com finos de minério oxidado da região Norte. Os autores reportaram uma resistência média de 2,45 MPa para briquetes aglomerados com fase inorgânica, valor próximo à média obtida nas condições deste estudo. É notável observar a influência da tipologia do minério, em seu estudo anterior com minério silicatado, Cheloni *et al.* (2023) obtiveram resistências de 4,02 MPa para briquetes também fabricados com componente inorgânico, sugerindo que a morfologia porosa e a granulometria do minério oxidado limitam naturalmente o ganho de resistência.

Voltando a observar Cheloni *et al.* (2024), a resistência máxima de 3,70 MPa foi alcançada apenas com uma dosagem elevada do sistema orgânico/inorgânico (16,2%). O fato de a Condição C ter atingido 2,58 MPa com uma dosagem de aglomerantes menor (15%) indica uma otimização eficiente, garantindo integridade estrutural suficiente para suportar a carga em um forno elétrico de redução sem o custo excessivo de altas dosagens de insumos.

## 5.6 Ensaio de Crepitação

A Figura 20 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de crepitação térmica para as três composições, juntamente com os respectivos desvios padrão.

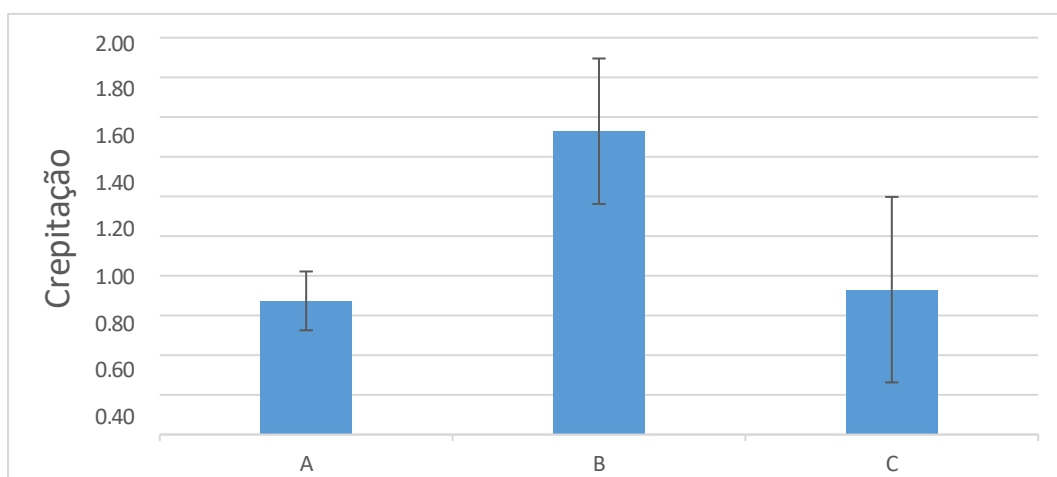


Figura 20: Resultados dos ensaios de crepitação.

Todas as formulações apresentaram excelente desempenho, com índices inferiores a 1,6%, situando-se bem abaixo do limite de 3% estabelecido por Carvalho (2014), evidenciando-se que todas as formulações são seguras para o carregamento em fornos elétricos. A condição A obteve o menor valor médio (0,67%), o que pode ser atribuído ao maior teor de componente inorgânico (7,5%). A condição C também apresentou resultado satisfatório (0,73). A condição B obteve o maior índice médio (1,53%), mas ainda demonstra estabilidade adequada para garantir a permeabilidade do leito de carga no forno.

Os baixos índices de crepitação obtidos nesta pesquisa (entre 0,67% e 1,53%) situam os briquetes em um patamar de elevada estabilidade, um resultado notável para aglomerados que contêm ligantes orgânicos. Em relação ao trabalho de Barbosa (2021), que utilizou cimento Portland, a autora obteve índices de crepitação entre 0% (desprezível) e 1,16% para as condições otimizadas. O fato de as formulações deste estudo que utilizam componentes orgânicos suscetíveis à queima terem alcançado resultados na mesma ordem de grandeza dos aglomerados de cimento demonstra uma estabilidade térmica altamente competitiva.

A análise em relação às investigações recentes de Cheloni *et al.* (2025) revela o verdadeiro diferencial técnico das formulações aqui desenvolvidas. Naquele estudo, ficou comprovado que o tipo de aglomerante é o fator determinante para a resistência ao choque térmico, sobrepondo-se à influência da tipologia do minério. Os autores

reportaram que briquetes produzidos exclusivamente com o sistema orgânico/inorgânico sofreram colapso estrutural severo devido à volatilização dos compostos orgânicos, apresentando índices de crepitação críticos tanto para o minério oxidado (62,07%) quanto para o silicatado (66,36%). Em contraste, a Condição C deste trabalho, mesmo contendo aglomerante orgânico em sua formulação, manteve um índice de apenas 0,73%.

Essa resistência superior é atribuída à presença estratégica da fase inorgânica na mistura. Conforme observado em Cheloni *et al.* (2025), briquetes feitos apenas com componente inorgânico apresentaram degradação quase nula, com índices de 0,06% para o minério oxidado e 0,09% para o silicatado. Portanto, na Condição C, a fase inorgânica atuou como uma matriz termicamente estável, enquanto a fase orgânica mista se decompunha a 700°C, a composição mineral do material inorgânico preservou as pontes de ligação física, impedindo a desintegração catastrófica observada nas amostras do componente orgânico na literatura. Fica demonstrado que a aliança entre a estabilidade térmica do inorgânico e a resistência mecânica a frio do sistema orgânico/inorgânico se torna um fator determinante para assegurar a permeabilidade do leito de carga.

Em síntese, observa-se que as diferentes formulações apresentaram resultados técnicos consistentes e situados em patamares bem próximos, validando a eficácia das misturas de aglomerantes testadas. A divergência mais significativa observada entre as amostras foi o comportamento da condição A no ensaio de absorção de água, no qual ocorreu a desintegração física do briquete, enquanto as demais condições mantiveram sua integridade estrutural.

## 6 CONCLUSÕES

A partir da produção dos briquetes utilizando resíduos da indústria de ferroligas (finos de minério oxidado, pó de despoeiramento e moinha de carvão) e da realização dos ensaios de qualidade para as diferentes misturas de aglomerantes, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- a) Os ensaios de resistência mecânica a frio demonstraram um excelente desempenho para todas as formulações. Tanto a resistência ao impacto quanto à resistência à abrasão apresentaram índices superiores a 99% para todas as condições (A, B e C). A Condição C (12% orgânico/inorgânico e 3% componente inorgânico) destacou-se com os maiores valores médios 99,94% para impacto e 99,75% para abrasão, e os menores desvios padrão, evidenciando uma estrutura interna uniforme e altamente coesa.
- b) Em relação à resistência à compressão uniaxial, os briquetes atingiram valores médios entre 2,43 e 2,58 MPa. Estes resultados superaram amplamente o limite mínimo de 0,35 MPa citado na literatura como necessário para o manuseio e carregamento industrial. A Condição C apresentou a maior resistência média (2,58 MPa), confirmando que a otimização dos aglomerantes mistos (redução da fase inorgânica e aumento de aglomerante orgânico/inorgânico) favorece a integridade estrutural sob carga.
- c) O ensaio de absorção de água revelou uma distinção crítica entre as formulações. A Condição A (com maior teor de componente inorgânico: 7,5%) sofreu desintegração total durante a imersão, devido à expansão da argila em contato com a água. Em contrapartida, a Condição C mostrou-se a mais estável, com uma absorção de apenas 6,99% e manutenção da integridade física. Conclui-se que o sistema orgânico/inorgânico atua como um agente impermeabilizante eficaz, viabilizando o armazenamento dos briquetes em pátios expostos a ação da água, ao contrário das misturas ricas em fase inorgânica.

- d) A avaliação do comportamento térmico (crepitação) indicou que todas as formulações são seguras para operação em fornos elétricos, apresentando índices de degradação inferiores a 1,6%, valor bem abaixo do limite crítico de 3%. Observou-se que a presença da fase inorgânica, mesmo em menor teor na Condição C (0,73% de crepitação), foi fundamental para atuar como uma matriz inorgânica estabilizadora, impedindo o colapso estrutural que ocorreria com a queima exclusiva da fase orgânica a 700°C.
- e) A análise de densidade aparente corroborou a superioridade da Condição C, que apresentou o maior valor médio (2,1486 g/cm<sup>3</sup>). A microestrutura resultante desta composição, favorecida pela maior proporção de ligante químico (orgânico/inorgânico), resultou em um aglomerado mais compacto, o que é benéfico tanto para a resistência mecânica quanto para a logística de transporte.
- f) Conclui-se, portanto, que a Condição C representa a formulação que ofereceu o melhor equilíbrio entre resistência mecânica, estabilidade térmica e resistência à água. O estudo comprovou a viabilidade técnica de briquetar finos de minério oxidado do Norte do Brasil juntamente com passivos ambientais (moinha de carvão e pó de britagem), produzindo uma carga metalúrgica robusta sem a necessidade de altas dosagens de aglomerantes ou o uso de outros ligantes.

## REFERÊNCIAS

- ALBARO, J. L. A. A operação de prensagem: considerações técnicas e sua aplicação industrial Parte II: a compactação. *Cerâmica Industrial, Castellón*, v. 5, n. 6, p. 14-20, 2000b.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM C170/C170M – 17: Standard Test Method for Compressive Strength of Dimension Stone. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM D440-07: Standard Test Method of Drop Shatter Test for Coal. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.
- AYYANDURAI, A.; PAL, J. Blast furnace flue dust as a potential carbon additive in hematite ore pellet. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*, v. 43, n. 5, p. 633–647, 2021. doi:10.1080/08827508.2021.1914607.
- BARBOSA, E. F. M.; CHELONI, L. M. M. S.; REIS, E. L. Influência da granulometria na resistência mecânica de briquetes de finos de minério de manganês. In: SEMINÁRIO DE AGLOMERAÇÃO DE MINÉRIOS, 10., 2024, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: [s. n.], 2024. p. 1–11.
- BARBOSA, Paôlla de Carvalho. Aproveitamento de finos de minério de manganês para aglomeração por briquetagem. 2021. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.
- BHATTACHARYA, S. C.; SETT, S.; SHRESTHA, R. M. State of the art for biomass densification. *Energy Sources*, v. 11, n. 3, p. 161-182, 1989.
- BIZHANOV, A. *et al.* Extruded briquettes–new charge component for the manganese ferroalloys production. *ISIJ International*, v. 54, n. 10, p. 2206–2214, 2014. doi:10.2355/isijinternational.54.2206.
- BRASIL. Agência Nacional de Mineração (ANM). Sumário Mineral Brasileiro 2017. Brasília: ANM, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatistica-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2017>. Acesso em: 24 maio 2024.
- BRINDLEY, G. W. Structural Mineralogy of Clays. *Clays and Clays Technology Bulletin*, v. 169, p. 53, 1955.
- BUTLER, J. W.; SKRIVAN, W.; LOTFI, S. Identification of optimal binders for torrefied biomass pellets. *Energies*, v. 16, n. 8, p. 3390, 2023.
- BY, Thomas. Briquetting of manganese oxide fines with organic binders. 2017. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, 2017.
- CARVALHO, E. A.; BRINCK, V.; CAMPOS, A. R. Aglomeração. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento de Minérios. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2018. p. 651-674.

CARVALHO, J. J. S. Influência da reatividade do coque siderúrgico sobre o processo de redução da pelota e do sinter destinados aos altos-fornos. 2014. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

CASTELÕES, R. C. M.; CAMPOS, A. R. Briquetagem de finos de barita da Bahia. Rio de Janeiro: CETEM, 1994. (Série Tecnologia Mineral, CT 02/75).

CHELONI, L. M. M. S.; COELHO, H. C. S.; SILVA, G. L. R.; REIS, E. L. Metallurgical behaviour of briquettes using fines wastes from the manganese ferroalloy manufacture. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2025. (Online).

CHELONI, L. M. M. S.; COTA, T. G.; REIS, E. L. Evaluation of compressive strength of manganese oxidized ore briquettes: effects of compaction pressure, curing time, and percentage of binder. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, v. 46, n. 2, p. 210–224, 2024.

CHELONI, L. M. M. S.; LOPES, L. A. V.; REIS, E. L. Compressive strength behavior of briquettes produced from manganese ore fines and metal dust: optimization using response surface methodology. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, v. 45, n. 6, p. 592–605, 2023.

CHERAGHI, A.; YOOZBASHIZADEH, H.; SAFARIAN, J. Gaseous reduction of manganese ores: a review and theoretical insight. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*, v. 41, n. 3, p. 198–215, 2019. doi:10.1080/08827508.2019.1604523.

CHETTY, D.; GUTZMER, J. Quantitative mineralogy to address energy consumption in smelting of ores from the Kalahari Manganese Field, South Africa. In: INFACON XV, 2018, Cape Town. Proceedings [...]. Cape Town: INFACON, 2018. p. 25–28.

CLARKE, D. E.; MARSH, H. Influence of coal/binder interactions on mechanical strength of briquettes. *Fuel*, v. 68, n. 8, p. 1023–1030, 1989. doi:10.1016/0016-2361(89)90069-0.

COETSEE, T. A review of ore smelting in high carbon ferromanganese production. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*, v. 41, n. 4, p. 255–278, 2019. doi:10.1080/08827508.2019.1634566.

CRAVEN, P. M.; WAUBY, J. W.; WELLBELOVED, D. B. Manganese. In: HABASHI, F. (ed.). *Handbook of Extractive Metallurgy*. 1. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 1997. v. 4, p. 1813–1860.

DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*. 5. ed. Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1988.

DE GISI, S. *et al.* Recovery of iron rich residues from integrated steel making process by hydrated lime/molasses pressurised cold agglomeration. *Journal of Cleaner Production*, v. 233, p. 830-840, 2019.

DE JESUS, Leandro Gustavo Mendes. Avaliação da pré-redução de briquetes de finos de minérios de manganês em ambientes análogos aos fornos elétricos a arco

submerso. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

DE JESUS, L. G. M.; TANGSTAD, M. CO reactivity of manganese lumps versus briquettes. *ISIJ International*, v. 60, n. 10, p. 2129-2133, 2020.

DE JESUS, L. G. M.; TANGSTAD, M. Prereduction of Manganese Briquettes Produced with Tailing Dam Materials from Urucum/Brazil. In: *INTERNATIONAL FERRO-ALLOYS CONGRESS (INFACON XVI)*, 16., 2021, Trondheim. Proceedings [...]. Trondheim: SINTEF/NTNU/FFF, 2021. p. 1-10.

DELLA BONA, A. Characterizing ceramics and the interfacial adhesion to resin: II - The relationship of surface treatment, bond strength, interfacial toughness and fractography. *Journal of Applied Oral Science*, Passo Fundo, v. 13, n. 2, p. 101-109, 2005.

DEMIRBA, A. Briquetting waste paper and wheat straw mixtures. *Fuel Processing Technology*, Elsevier Science B.V., v. 55, n. 2, p. 175-183, maio 1998.

DIAZ, L. *et al.* Recycling of Mn-rich ore fines, dust and sludge briquettes in Mn alloys production. In: *INTERNATIONAL FERRO-ALLOYS CONGRESS (INFACON XVI)*, 16., 2021, Trondheim. Proceedings [...]. Trondheim: SINTEF/NTNU/FFF, 2021.

DING, Weizhong; OLSEN, Sverre E. Reaction equilibria in the production of manganese ferroalloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*, v. 27B, n. 1, p. 5-17, fev. 1996.

DUBOS, J. L. *et al.* Binder-free tableting experiments on manganese oxides and industrial mineral powders. *Powder Technology*, v. 377, p. 194–211, 2021. doi:10.1016/j.powtec.2020.08.032.

EISELE, T. C.; KAWATRA, S. K. A review of binders in iron ore pelletization. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*, v. 24, n. 1, p. 1–90, 2003. doi:10.1080/08827500306896.

ELISHEVICH, A. T. *Briquetting Coal with Binders [em Russo]*. Moscow: Nedra, 1972.

FARIA, Geraldo Lúcio. Estudo da intensidade de crepitação de minérios granulados de manganês do Brasil. 2008. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

FARIA, Geraldo Lúcio de. Estudo geometalúrgico de granulados e pelota de minério de manganês. 2011. 302 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

FARIA, G. L.; JANNOTTI, N.; ARAÚJO, F. G. S. Decrepitation behavior of manganese lump ores. *International Journal of Mineral Processing*, v. 102-103, p. 150-155, jan. 2012.

FARIA, G. L. *et al.* Disintegration on heating of a Brazilian manganese lump ore. *International Journal of Mineral Processing*, v. 124, p. 132-137, 2013.

- FEECO INTERNATIONAL. The Agglomeration Handbook. Green Bay, USA, 2018.
- GASIK, M. I. Manganese. Moscow: Metallurgiya, 1992. 608 p.
- GASIK, M. I.; LYAKISHEV, N. P.; GASIK, M. M. Physical chemistry and technology of ferroalloys [em Ucrainiano]. Dnipropetrovsk: Sistemnye Technologii, 2009. 494 p.
- GONÇALVES, E.; SERFATY, A. Perfil Analítico do Manganês. Boletim nº 37. Brasília: Ministério das Minas e Energias, DNPM, 1976. 149 p.
- HALT, J. A.; KAWATRA, S. K. Review of organic binders for iron ore concentrate agglomeration. *Mining, Metallurgy & Exploration*, v. 31, n. 2, p. 73–94, 2014. doi:10.1007/BF03402417.
- IVESON, S. M. *et al.* Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: a review. *Powder Technology*, v. 117, n. 1, p. 3-39, 2001.
- KALIYAN, Nalladurai; MOREY, R. Vance. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, n. 3, p. 337-359, 2009.
- KHUDYAKOV, A. *et al.* Optimization of briquetting technology of fine-grained metallurgical materials based on statistical models of compressibility. *Powder Technology*, v. 412, p. 118025, 2022. doi:10.1016/j.powtec.2022.118025.
- KOZHEVNIKOV, I. Yu.; RAVICH, B. M. Agglomeration and the Principles of Metallurgy [em Russo]. Moscow: Metallurgiya, 1991.
- KURUNOV, I.; BIZHANOV, A. Stiff Extrusion Briquetting in Metallurgy. Moscow: Springer International Publishing, 2018. 169 p. (Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering).
- KUTSYN, V. S.; POLYAKOV, O. I.; GASIK, M. I. Electric and technology regimes of large-scale manganese ferroalloys smelting in high-power furnaces. Dnipropetrovsk: Ekonomika, 2011. 316 p.
- LEÃO, Paula Maria Gomes Cunha. Tecnologia da briquetagem de minério de ferro e carvão para uso como carga em altos-fornos e da utilização de rejeitos da mineração de ferro como matéria-prima. 2021. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.
- LUMMUS, J. L.; AZAR, J. J. Drilling Fluids Optimization a Practical Field Approach. Tulsa, Oklahoma: Penn-Well Publishing Company, 1986.
- LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves. Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. 965 p.
- MADIAS, J. A review of the production of ferromanganese in blast furnace. In: AISTECH, 2011, Indianapolis. Proceedings [...]. Indianapolis: AIST, 2011. v. 1, p. 401–412.
- MATRICARDI, L. R.; DOWNING, J. Manganese and manganese alloys. In: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. 4. ed. [S. I.]: John Wiley, 1995. v. 15, p. 963–990.

- MENDES, C. M.; OLIVEIRA, L. T. O Manganês para fins metalúrgicos. In: Siderurgia Brasileira e Matérias-Primas. São Paulo: Associação Brasileira de Metais (ABM), 1982. p. 465-489.
- MINERAL PROCESSING AND EXTRACTIVE METALLURGY REVIEW. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. [S. l.], 2002.
- OLSEN, S. E.; TANGSTAD, M.; LINDSTAD, T. Production of Ferromanganese Alloys in the Submerged Arc Furnace. Trondheim, Norway: SINTEF/NTNU, 2007. 247 p.
- PAIVA, L. B.; MORALES, A. R.; DÍAZ, F. R. V. An overview on organophilic clays: properties, routes of preparation and applications. Applied Clay Science, 2007.
- PANNETIER, N.; HABAS, J. P.; FRANÇOIS, J. A comparative rheological study of lime/molasses and sucrose/lime/water mixtures in the presence of additives. Applied Rheology, v. 10, n. 5, p. 238-247, 2000.
- PIETSCH, W. B. Agglomeration processes: Phenomena, technologies, equipment. Weinheim: John Wiley & Sons, 2002. 622 p.
- POCHART, G. L. J.; TOUCHARD, N.; PERDON, C. Metallurgical Benefit of Reactive High Grade Ore in Manganese Alloys Manufacturing. In: INFACON 2007, New Delhi, India. Proceedings [...]. New Delhi: [s. n.], 2007.
- POSTLE, M. *et al.* Manganese, The Global Picture – A Socio Economic Assessment. International Manganese Institute Report. Loddon, Norfolk, 2015. 58 p.
- RICHARDS, S. R. Physical testing of fuel briquettes. Fuel Processing Technology, Amsterdam, v. 25, n. 2, p. 89-100, 1990.
- ROSS, C. S.; SHANNON, E. V. Minerals of Bentonite and Related Clays and Their Physical Properties. Journal of American Ceramic Society, v. 9, p. 77, 1926.
- RYOU, J. H. *et al.* Coal briquette having superior strength and briquetting method thereof. Patent No. WO 02/50219 A1. World Intellectual Property Organization, 2002.
- SAH, R.; DUTTA, S. K. Effects of binder on the properties of iron ore-coal composite pellets. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, v. 31, n. 2, p. 73–85, 2010.
- SANTANA, Amilton Luiz. Manganês. In: Economia mineral do Brasil. Brasília: DNPM/MME, 2009. p. 117–128.
- SILVA, A. R. V.; FERREIRA, H. C. Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 26–35, 2008.
- SILVA, G. I. R. da *et al.* Utilização de Finos de Carvão Vegetal para Produção de Biocoque Metalúrgico. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 46., 2016, Rio de Janeiro. Anais [...]. São Paulo: Editora Blucher, 2016. p. 127-136.

SINGH, V., Ghosh, T. K., Ramamurthy, Y., Tathavadkar, V. Beneficiation and agglomeration process to utilize low-grade ferruginous manganese ore fines. *International Journal of Mineral Processing*, v. 99, n. 1-4, p. 84-86, 2011.

SUNDE, M. Organic binder as a substitute for bentonite in ilmenite pelletization. 2012. Dissertação (Mestrado) – Institutt for materialteknologi, Norwegian University of Science and Technology, 2012.

TANAKA, M. T. Estudo experimental de briquetes autorredutores e auto-aglomerantes de minério de ferro e carvão fóssil. 2014. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

TANGSTAD, M. Manganese ferroalloys technology. In: *Handbook of ferroalloys*. [S. l.]: Elsevier, 2013. p. 221–266.

THOMAS, M.; VAN VLIET, T.; VAN DER POEL, A. F. B. Physical quality of pelleted animal feed. 3. Contribution of feedstuff components. *Animal Feed Science and Technology*, v. 76, p. 59–78, 1998.

THOMS, L.; SNAPE, C.; TAYLOR, D. Physical characteristics of cold cured anthracite/coke breeze briquettes prepared from a coal tar acid resin. *Fuel: The Science and Technology of Fuel and Energy*, v. 78, n. 14, p. 1691-1695, 1999.

TRAJANO, R. B. Princípios de Tratamento de Minérios. [S. l.: s. n.], 1966.

TUSET, J. Kr.; SANDVIK, J. SINTEF Research Report No. 340358. Trondheim, Norway, 1970.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Manganese. In: *Mineral commodities summary 2018*. Washington, 2019.

ZHANG, G.; SUN, Y.; XU, Y. Review of briquette binders and briquetting mechanism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 477–487, 2018. doi:10.1016/j.rser.2017.09.072.

ZHOU, Y.; KAWATRA, S. K. Humic substance-based binder in iron ore pelletization: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, v. 38, n. 5, p. 321–337, 2017. doi:10.1080/08827508.2017.1328598.