



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



LUIZ AUGUSTO DA VEIGA LOPES

**ESTUDOS DOS EFEITOS DOS AGLOMERANTES NA PRODUÇÃO
DE BRIQUETES DE REJEITOS DA CADEIA DE PRODUÇÃO DE
FERRO LIGAS DE MANGANÊS**

Ouro Preto, 2023

LUIZ AUGUSTO DA VEIGA LOPES

**ESTUDOS DOS EFEITOS DOS AGLOMERANTES NA PRODUÇÃO
DE BRIQUETES DE REJEITOS DA CADEIA DE PRODUÇÃO DE
FERRO LIGAS DE MANGANÊS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau em Engenheiro Metalúrgico

Orientadora: Profa. Dra. Érica Linhares Reis

Coorientadora: Profa. Msc. Letícia Maria de Melo Silva Cheloni

**Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
2023**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

L864e Lopes, Luiz Augusto Da Veiga.
Estudos dos efeitos dos aglomerantes na produção de briquetes de rejeitos da cadeia de produção de ferro ligas de manganês. [manuscrito] / Luiz Augusto Da Veiga Lopes. - 2023.
47 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Érica Reis.
Coorientadora: Ma. Letícia Cheloni.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Minérios de manganês. 2. Aglomeração. 3. Minérios de manganês - Briquetes (Combustível). I. Reis, Érica. II. Cheloni, Letícia. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 669

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Luiz Augusto da Veiga Lopes

ESTUDOS DOS EFEITOS DOS AGLOMERANTES NA PRODUÇÃO
DE BRIQUETES DE REJEITOS DA CADEIA DE PRODUÇÃO DE
FERRO LIGAS DE MANGANÊS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal
de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico

Aprovada em 04 de setembro de 2023

Membros da banca

Profa. Msc. Letícia Maria de Melo Silva Cheloni - Presidente - (Coorientadora – IFMG/Ouro Branco - PPGEM/UFOP),

Msc. Tamiris Fonseca de Souza (Membro – PPGEM/UFOP)

Msc. Mariana Caroline Andrade Silva (Membro – PPGEM/UFOP).

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 19/09/2023



Documento assinado eletronicamente por **Erica Linhares Reis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/09/2023, às 11:41, 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, informando o código verificador **0591647** e o código CRC **9A44855B**.

RESUMO

A geração de finos de minério de manganês durante o beneficiamento motiva o seu aproveitamento, uma vez que seu uso direto em fornos elétricos de redução depende da aglomeração para viabilizá-lo. Neste contexto, este trabalho surgiu com a proposta de produção de briquetes a partir de finos de minério de manganês da região de São João Del Rei (MG). Desta forma, foi estudado o método de aglomeração por briquetagem que se apresenta como uma alternativa viável para recuperar essas partículas, com a utilização de dois diferentes tipos de aglomerantes, a bentonita e a cal hidratada com o melaço da cana de açúcar. As caracterizações realizadas neste trabalho foram a análise granulométrica, a análise de difratometria de raio X, análise termogravimétrica e análise química. O planejamento fatorial auxiliou nas combinações experimentais dos fatores: pressão de compactação (25MPa e 80MPa), tempo de cura (4 dias e 18 dias), bentonita (3% e 12%) e cal hidratada/melaço da cana (12% e 18%) e os pontos centrais, nas propriedades resistência ao impacto, ao tamboramento e densidade aparente. Adicionalmente foi realizado o ensaio de crepitação nos briquetes e no minério de manganês granulado já implementado na indústria de ferro ligas para comparação. O fino de minério de manganês possui uma ampla distribuição granulométrica (0,037mm até 6,50mm), além de possuir em sua composição mineralógica os principais minerais de manganês, (todorokita, espessartita e pirolusita) além do mineral ganga quartzo. O pó do britador, subproduto da cadeia de produção apresentou granulometria menor na faixa de $4\mu\text{m}$ a $125\mu\text{m}$. O maior valor da porcentagem de bentonita (12%) foi a variável que mais influenciou nos resultados de resistência ao impacto e ao tamboramento. Maiores tempos de cura de 18 dias são interessantes para briquetes aglomerados com cal hidratada e melaço, por proporcionar maiores valores de resistência ao impacto. O índice de crepitação para briquetes de bentonita aproximou ao dos granulados, ao contrário de briquetes com aglomerante cal hidratada e melaço.

Palavras-chaves: Aglomeração; Briquetagem; Finos de minério de manganês; Planejamento experimental fatorial.

ABSTRACT

The generation of manganese ore fines during beneficiation motivates their utilization, as their direct use in electric reduction furnaces depends on agglomeration to make it viable. In this context, this work emerged with the proposal to produce briquettes from manganese ore fines from the São João Del Rei (MG). Thus, the agglomeration method of briquetting was studied as a viable alternative to recover these particles, using two different types of binders, bentonite, and hydrated lime with sugarcane molasses. The characterizations carried out in this work included particle size analysis, X-ray diffraction analysis, thermogravimetric analysis, and chemical analysis. Factorial planning assisted in the experimental combinations of factors: compaction pressure (25MPa and 80MPa), curing time (4 days and 18 days), bentonite (3% and 12%), and hydrated lime/sugarcane molasses (12% and 18%), and central points, in the properties of impact resistance, drumming resistance, and bulk density. Additionally, a crepitation test was performed on the briquettes and on the granulated manganese ore already implemented in the ferroalloy industry for comparison. The manganese ore fines have a wide particle size distribution (0.037mm to 6.50mm) and contain the main manganese minerals in their mineralogical composition (todorokite, espessartite, and pyrolusite), as well as gangue mineral quartz. The crusher powder, a byproduct of the production chain, had a smaller particle size in the range of $4\mu\text{m}$ a $125\mu\text{m}$. The higher percentage of bentonite (12%) was the variable that most influenced the impact resistance and drumming resistance results. Longer curing times of 18 days are beneficial for briquettes agglomerated with hydrated lime and molasses, as they provide higher impact resistance values. The crepitation index for bentonite briquettes approached that of the granules, unlike briquettes with hydrated lime and molasses as binders.

Key-words: Agglomeration; Briquetting; Manganese ore fines; Factorial experimental design.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Forno elétrico a arco submerso.	13
Figura 2 – Fluxograma do processo de beneficiamento do minério de manganês.	14
Figura 3 – Granulado e aglomerados por sinterização, briquetagem e pelotização.	15
Figura 4 – Estrutura da bentonita.	19
Figura 5 – Fluxograma da metodologia de preparo dos briquetes.	22
Figura 6 – Aglomerantes (Bentonita, Melaço e Cal Hidratada).	23
Figura 7 – Peneirador vibratório.	23
Figura 8 – Fluxograma da produção dos briquetes.	24
Figura 9 – Molde para produção de briquetes.	25
Figura 10 – Prensa Hidráulica.	26
Figura 11 – Esquema do ensaio de resistência ao impacto.	27
Figura 12 – Recipientes com briquetes para ensaio de crepitação.	28
Figura 13 – Distribuição granulométrica do fino de minério de manganês	30
Figura 14 – Distribuição granulométrica do pó do britador.	31
Figura 15 – Difratograma de raios X do fino de minério de manganês.	32
Figura 16 – Análise termogravimétrica do fino de minério de manganês.	33
Figura 17 – Gráfico de Pareto da variável resposta resistência ao impacto (Bentonita).	35
Figura 18 – Gráfico de efeitos principais da variável resposta resistência ao impacto (Bentonita).	35
Figura 19 – Gráfico de Pareto da variável resposta resistência ao impacto (Cal hidratada/Melaço da cana).	36
Figura 20 – Gráfico de efeitos principais da variável resposta resistência ao impacto (Cal hidratada/Melaço da cana).	36
Figura 21 – Gráfico de Pareto da variável resposta tamboramento (Bentonita).	37
Figura 22 – Gráfico de efeitos principais da variável resposta tamboramento (Bentonita).	37
Figura 23 – Gráfico de Pareto da variável resposta tamboramento (Cal hidratada/Melaço da cana).	38
Figura 24 – Gráfico de efeitos principais da variável resposta tamboramento (Cal hidratada/Melaço da cana).	38
Figura 25 – Gráfico de Pareto da variável resposta densidade (Bentonita).	39
Figura 26 – Gráfico de efeitos principais da variável resposta densidade (Bentonita).	39
Figura 27 – Gráfico de Pareto da variável resposta densidade (Cal hidratada/Melaço da cana).	40
Figura 28 – Gráfico de efeitos principais da variável resposta densidade (Cal hidratada/Melaço da cana).	40
Figura 29 – Briquetes armazenados por 6 meses	41

Figura 30 – Granulados armazenados por 6 meses	42
Figura 31 – Resultados da crepitação do briquete utilizando aglomerante bentonita.	43
Figura 32 – Resultados da crepitação do granulado.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formas alotrópicas do manganês	11
Tabela 2 – Principais minerais de manganês.	12
Tabela 3 – Planejamento experimental fatorial completo 2^3 com triplicata no ponto central utilizado para cada aglomerante.	29
Tabela 4 – Níveis, variáveis e valores.	29
Tabela 5 – Análise Química	31
Tabela 6 – Resultados para o aglomerante bentonita.	34
Tabela 7 – Resultados para o aglomerante cal hidratada/melaço da cana.	34
Tabela 8 – Valores do ensaio de crepitação	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	10
2.1	Objetivo Geral	10
2.2	Objetivos Específicos	10
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1	Manganês e Minério de Manganês	11
3.1.1	<i>Geração de finos na cadeia produtiva</i>	13
3.2	Técnicas de aglomeração	14
3.2.1	<i>Pelotização</i>	15
3.2.2	<i>Sinterização</i>	15
3.2.3	<i>Briquetagem</i>	16
3.2.3.1	Avaliação da qualidade dos briquetes	16
3.3	Aglomerantes	18
3.3.1	<i>Bentonita</i>	18
3.3.2	<i>Cal hidratada e Melão</i>	19
3.4	Aplicação de finos de minérios na elaboração de briquetes	20
4	MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1	Finos de minério de Manganês e aglomerantes	22
4.2	Caracterização da matérias-primas	23
4.2.1	<i>Peneiramento a Úmido do fino de minério de manganês</i>	23
4.2.2	<i>Difração de raios-X</i>	24
4.2.3	<i>Análise termogravimétrica</i>	24
4.2.4	<i>Análise química</i>	24
4.3	Produção dos Briquetes	24
4.3.1	<i>Mistura da matéria prima e preenchimento de moldes</i>	25
4.3.2	<i>Compactação e Secagem</i>	25
4.4	Ensaio Físicos	26
4.4.1	<i>Resistência ao impacto</i>	26
4.4.2	<i>Tamboramento</i>	27
4.4.3	<i>Densidade Aparente</i>	27
4.5	Ensaio adicional de crepitação após armazenamento	27
4.6	Planejamento Experimental	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	30

5.1	Caracterização das matérias primas	30
5.1.1	<i>Análise granulométrica</i>	30
5.1.2	<i>Caracterização Química</i>	31
5.1.3	<i>Análise DRX</i>	32
5.1.4	<i>Análise Termogravimétrica</i>	33
5.2	Qualidade dos briquetes	34
5.2.1	<i>Resistência ao impacto</i>	35
5.2.2	<i>Tamboramento</i>	37
5.2.3	<i>Densidade</i>	39
5.3	Análises adicionais	41
5.3.1	<i>Análise visual do briquete devido ao tempo de armazenamento</i>	41
5.3.2	<i>Crepitação</i>	42
6	CONCLUSÕES	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

O manganês é um elemento essencial em diversos campos, sendo as indústrias do aço os principais consumidores. A adição deste metal proporciona melhorias nas propriedades do aço como tenacidade, dureza e resistência (TANGSTAD, 2013).

Atualmente, há uma tendência de aumento na capacidade de produção das siderúrgicas no mundo, chegando a aproximadamente 4 milhões de toneladas de aço para o ano de 2030. Desta forma, o Brasil se beneficia dessa demanda, aumentando a produção de ferro-ligas de manganês e consequentemente exigindo mais das reservas brasileiras (AFONSO, 2020).

Entretanto, durante as principais etapas de beneficiamento de minérios de manganês gera-se aproximadamente 30% de finos, acarretando problemas ambientais e econômico no setor minero-metalúrgico (BY, 2017; BARBOSA, 2021). O uso direto destes finos em fornos elétricos de redução dificulta na percolação dos gases, podendo ocasionar acidentes nas usinas. Assim, a técnica de aglomeração é uma alternativa para utilização destes finos (SINGH et al., 2011; BY, 2017; CHELONI; LOPES; REIS, 2023).

A aglomeração de partículas finas refere-se ao processo de transformar materiais finos em partículas maiores, facilitando o uso e manuseio. A união destas partículas pode ser feita por diferentes métodos como briquetagem, pelletização e sinterização (FEECO, 2018). A técnica de briquetagem, patenteada por William Easby em 1848, consiste em formar aglomerados por meio da aplicação de pressão sobre partículas finas, utilizando aglutinantes ou não, a fim de gerar um produto com forma, dimensões e parâmetros mecânicos ideais (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Por isso, estudar de maneira sistêmica os finos de minério de manganês aglomerados por briquetagem utilizando diferentes aglomerantes, se torna importante para o campo minero-metalúrgico.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estudar o desempenho físico e os efeitos dos aglomerantes, bentonita e cal hidratada/melaço da cana em briquetes elaborados a partir de finos de minério de manganês e pó do britador, lavrado no distrito manganésífero de São João del Rei no estado de Minas Gerais.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar a caracterização física, química e mineralógica do fino de minério de manganês.
- Realizar a caracterização granulométrica e química do pó do britador.
- Caracterizar quimicamente as matérias primas utilizadas na elaboração dos briquetes.
- Efetuar o planejamento fatorial dos experimentos de briquetagem, analisando as interações das variáveis (porcentagem de aglomerante, tempo de cura, pressão de compactação) com as seguintes variáveis respostas (resistência ao impacto, densidade, tamboramento).
- Estudar a crepitação após determinado tempo de armazenamento de briquetes elaborados a partir dos pontos centrais do planejamento experimental.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo busca sintetizar, brevemente, informações sobre o minério de manganês, os aglomerantes bentonita e cal e melaço que foram utilizados no trabalho, assim como a técnica utilizada para a aglomeração. Para isso, foi considerado o ambiente minero-metalúrgico para a aplicação tecnológica do processo de briquetagem.

3.1 Manganês e Minério de Manganês

O metal manganês na tabela periódica é representado com o símbolo (Mn), tendo como número atômico 25 e massa atômica relativa igual a 55. A valência do elemento pode variar de +1 até +7, sendo +2 e +4 as mais comuns. O ponto de fusão do manganês de 1244°C, e o ponto de ebulição 2150°C (TANGSTAD, 2013).

O manganês se apresenta sob quatro formas alotrópicas principais, conforme apresentado na Tabela 1, que apresenta sua estrutura, faixa de temperatura o qual é encontrado, parâmetro de rede e densidade (MATRICARDI; DOWNING, 2000).

Tabela 1 – Formas alotrópicas do manganês

Estrutura	Faixa Temperatura	a (distância entre átomos)	Densidade
$\alpha - Mn$	Abaixo 727°C	0,89124nm	7,44g/cm ³
$\beta - Mn$	727°C até 1090°C	0,6289nm	7,29g/cm ³
$\gamma - Mn$	1090°C até 1138°C	0,3855nm	6,37g/cm ³
$\delta - Mn$	Acima 1138°C	0,3075nm	6,28g/cm ³

Fonte: Adaptado de (TANGSTAD, 2013).

O manganês se apresenta como o quarto metal mais usado no mundo segundo estudos realizados pelo International Manganese Institute, com diferentes aplicações, por exemplo: objetos metálicos, baterias, fertilizantes, entre outros (IMNI, 2023).

O manganês é comumente encontrado em diferentes lugares no planeta com concentração média aproximada a 0,1%, sendo este elemento encontrado em minerais dos grupos dos óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos (TANGSTAD, 2013). A Tabela 2 refere-se aos diferentes tipos de minerais de manganês e seus respectivos grupos.

Em torno de 90% da produção do manganês é aplicada em siderúrgicas, em sua maioria, sob a forma de ferro-ligas. O manganês é incorporado de modo a adequar cada liga a sua especificação técnica desejada, a proporção aproximada de 10kg de manganês para a produção de uma tonelada de aço. O uso do minério de manganês diretamente em fornos siderúrgicos é inferior a 7% sendo relativamente menor quando comparado às suas outras formas, como o manganês metálico, ligas de siliciomanganês e ferro manganês (TANGSTAD, 2013).

Tabela 2 – Principais minerais de manganês.

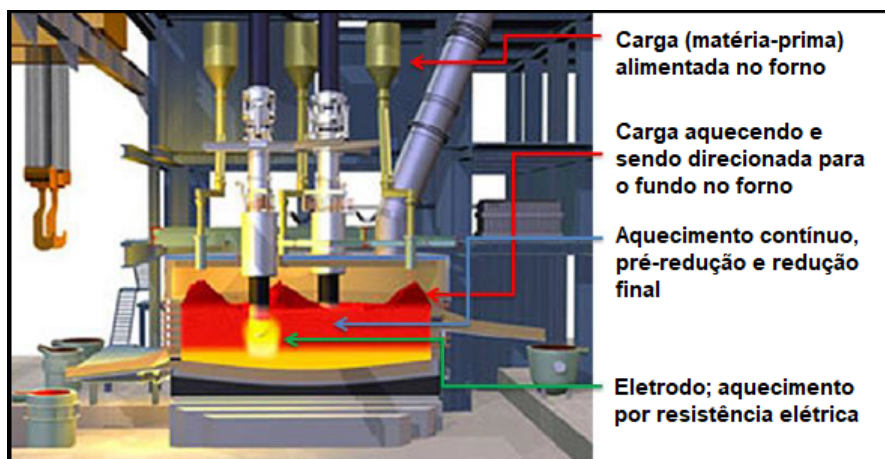
Classe Mineral	Nome	Fórmula Química
Óxidos	Pirolusita	MnO_2
	Vernadita	$MnO_2 \cdot H_2O$
	Braunita	$3(Mn,Fe)_2O_3 \cdot MnSiO_3$
	Braunita II	$7(Mn,Fe)_2O_3 \cdot CaSiO_3$
	Manganita	$\gamma\text{-}MnOOH$
	Psilomelano	$(K,Ba)(Mn^{+2}Mn^{+4})_8O_{16}(OH)_4$
	Cryptomelano	$(K,Ba)Mn_8O_{16} \cdot xH_2O$
	Hollandita	$(Ba,K)Mn_8O_{16} \cdot xH_2O$
	Todorokita	$(Ca,Na,K)(Mn^{2+}Mn^{4+})_6O_{12} \cdot xH_2O$
	Hausmannita	$Mn,Fe)_3O_4$
	Jacobsita	Fe_2MnO_4
	Bixbyita	$(Mn,Fe)_2O_3$
	Carbonatos	Manganocalcita
Oligonita		$(Fe,Mn)CO_3$
Rodocrosita		$MnCO_3$
Silicatos	Rodonita	$MnSiO_3$
	Tefroita	Mn_2SiO_4
Sulfetos	Alabandina	MnS
	Gauerita	MnS_2

Fonte: Adaptado de Tangstad (2013) e Barbosa (2021).

A adição do manganês sob a forma de ferro-ligas proporciona melhorias nas propriedades do aço como tenacidade, dureza, resistência mecânica, além de controlar o nível de enxofre e auxiliar na remoção de oxigênio. Além disso, possibilita uma melhora nos resultados de tratamentos térmicos do tipo têmpera, ao facilitar a transformação do estado austenítico em ferrita por meio da alteração da temperatura de transformação (MATRICARDI; DOWNING, 2000).

As ligas de ferro manganês de alto carbono e de ferro silício manganês são as mais produzidas. O processo ocorre por meio da redução carbotérmica do minério de manganês a altas temperaturas em fornos elétricos a arco submerso (COSTA, 2020). Observa-se o forno elétrico a arco submerso na Figura 1.

Figura 1 – Forno elétrico a arco submerso.



Fonte: Adaptado de (BY, 2017).

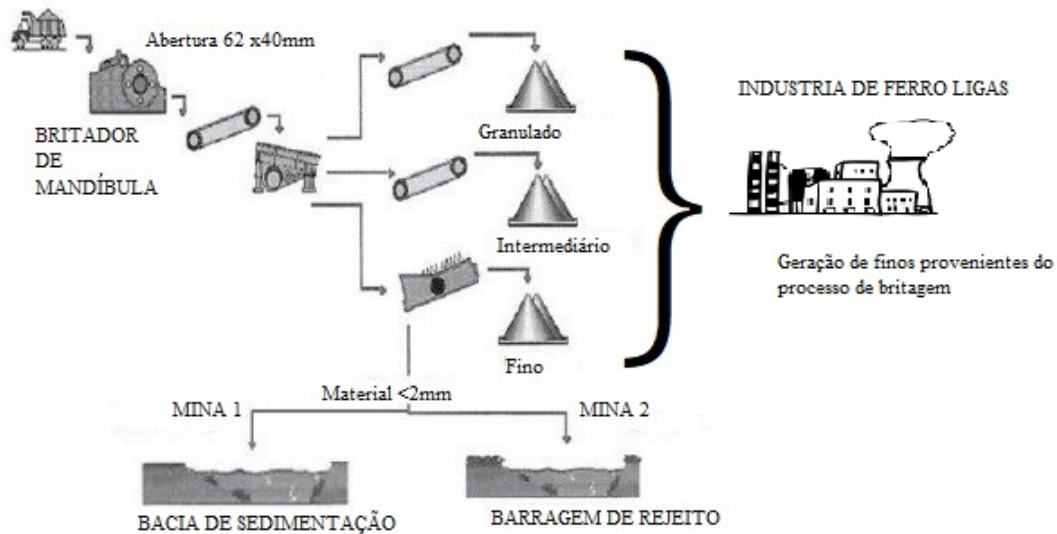
As matérias primas utilizadas são minério, fundentes (dolomita, calcário), e agentes carbonáceos (coque e carvão vegetal), para atender a composição requerida da liga. Os fundentes básicos são acrescentados a fim de conferir à escória aceitáveis propriedades químicas, temperatura de fusão e viscosidade, visando alto rendimento na produção da liga e consequentemente melhorando a eficiência do forno. A blendagem de diferentes minérios é uma prática comum para obter uma relação específica Mn/Fe no aço, por exemplo, uma produção de liga ferro manganês de alto carbono 78% Mn tem proporção 7:1. Os teores de Fe e P da liga são definidos e controlados pela composição da mistura de minério, pois óxidos destes elementos podem se tornar indesejáveis ao serem facilmente reduzidos (TANGSTAD, 2013).

3.1.1 Geração de finos na cadeia produtiva

As instalações de beneficiamento na mina situada no distrito de São João Del Rei demonstra o procedimento que compreende a britagem e rebitagem do minério por meio de um britador de mandíbulas, seguido de uma fase de classificação granulométrica. Neste processo, a separação de tamanho é realizada utilizando peneiras vibratórias e um classificador helicoidal. O material é classificado em 3 tipos quanto à granulometria: superiores a 12mm nomeados granulados, no intervalo de 12mm a 6mm categorizados como intermediário. As partículas com granulometria abaixo de 6mm são destinadas ao classificador espiral cujo *underflow* de granulometria no intervalo de 6mm a 2mm intitula-se fino. A porção excedente, com dimensões inferiores a 2,0mm, é descartada por meio de bacias de sedimentação ou direcionada diretamente à barragem (BARBOSA, 2021).

As ligas de FeSiMn (ferro sílico manganês) e FeMnAC (ferro manganês alto carbono) são produzidas a partir de um longo processo metalúrgico de redução, ao qual as ligas após resfriadas e solidificadas são destinadas a processo de cominuição em britadores afim de adequar o produto, tendo como consequência a geração de finos classificados como pó do britador. O fluxograma na Figura 2 apresenta a cadeia do processo.

Figura 2 – Fluxograma do processo de beneficiamento do minério de manganês.



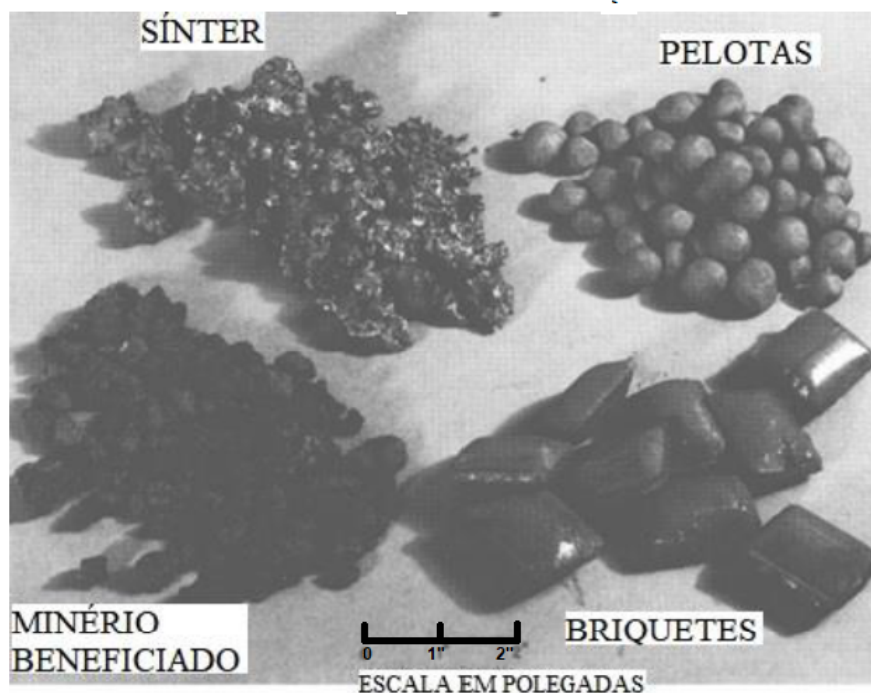
Fonte: Adaptado de Barbosa (2021)

3.2 Técnicas de aglomeração

Pietsch (2002) define o aumento de tamanho por aglomeração como a formação de partículas maiores a partir de sólidos particulados, unindo as partículas por mecanismos de ligação entre as próprias partículas ou por meio de aglomerantes, substâncias que aderem química ou fisicamente às superfícies sólidas e formam um ligante entre as partículas. Os mecanismos de ligação são pontes sólidas; forças de adesão e coesão; forças capilares e tensão superficial; força atrativa entre partículas sólidas; ligações de intertravamento.

As técnicas de aglomeração desempenham a função de união de partículas de tamanho micrométrico, promovendo a transformação dos materiais em corpos ou frações coesas de tamanho superior, por meio de ligações rígidas e/ou solidificação das partes. Para isso são utilizados mecanismos químicos e/ou físicos tornando viável a sua utilização por obterem forma e tamanho satisfatórios aos processos posteriores. Os mais relevantes processos de aglomeração de finos de minérios são sinterização, pelotização e briquetagem. A Figura 3 apresenta as três diferentes formas de aglomeração de finos de minério e o minério granulado para comparação (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Figura 3 – Granulado e aglomerados por sinterização, briquetagem e pelotização.



Fonte: Barbosa (2021).

3.2.1 Pelotização

Partículas menores do que 0,15mm são impróprias para o uso direto em fornos tornando o desenvolvimento da técnica de aglomeração, conhecida como pelotização, de suma importância para o não descarte dessas partículas. Esse material fino é produto dos processos de beneficiamento de minérios como a moagem e concentração. Dessa forma, a pelotização consiste em aglomerar finos de minério com o auxílio de um aglomerante e, ocasionalmente, adiciona-se uma pequena proporção de combustível sólido para fornecer calor parcial ao processo de queima. O processo de pelotização gera pelotas cruas(ou verdes) que passam posteriormente pela secagem, são pré aquecidas e queimadas, de modo a formar esferas de diâmetro aproximado de 12mm, com características físicas, químicas e metalúrgicas apropriadas ao uso direto em fornos (MOURÃO, 2017; CHIAVERINI, 1986).

3.2.2 Sinterização

Sinterização é uma técnica de aglomeração de finos de minério em que a superfície das partículas finas fundem formando aglomerados maiores, necessitando de calor para ocorrer (MALAN; BARTHEL; DIPPENAAR, 2004).O processo de sinterização constitui-se em formar uma mistura contendo os finos do minério e carvão, antracito ou coque metalúrgico. A carga metálica passa por uma trajetória em que o aglomerado é aquecido e queimado com sucção de ar em temperaturas de 1300°C a 1500°C, unindo as partículas finas permanentemente e gerando um produto homogêneo e com poros, o sinter (CHIAVERINI, 1986).

3.2.3 Briquetagem

A briquetagem é um método de aglomeração em que há aplicação de uma pressão, desta forma uma força compressiva é exercida sobre o material a ser unido por forças de natureza química e/ou física no formato requerido (BY, 2017). Os finos também podem ser aglomerados por briquetagem em altas temperaturas, sem aglutinante ou em baixas temperaturas com aglutinantes como exemplo o melão, piche, e betuminoso (BRISSE; ROHAUS, 1965).

De acordo com Lemos et al. (2019) é importante que o aglomerado resista ao manuseio, transporte e armazenamento, ao ser carregado nos fornos. Há inúmeros fatores que se relacionam com esta resistência como: temperatura, faixa granulométrica, pressão de briquetagem, umidade e tipo de ligante. A distribuição de tamanho de partículas ideal nos aglomerados é composta por partículas de tamanho 1,0mm a 3,0mm que atuam como porção nucleante, enquanto partículas com granulometria inferior a 0,2mm atuam como adesivas a partículas mais grossas, promovendo melhor a compactação (PAN et al., 2016; DEHONT, 2006). A umidade das matérias primas pode atuar como aglomerante auxiliando no processo de briquetagem ou mesmo a umidade pode ativar outros compostos aglomerantes presentes na mistura (KALIYAN; MOREY, 2009; SILVA et al., 2017). A pressão de briquetagem proporciona a redução do volume do material, ao eliminar os gases no interior dos vazios do briquete. O material de granulometria mais fina, promove um número menor de poros que será eliminado durante a compactação, refletindo na alteração de volume, ocasionando na aproximação da densidade aparente do valor real da densidade do briquete (CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018).

3.2.3.1 Avaliação da qualidade dos briquetes

A briquetagem de materiais finos é o método mais comum de reciclar combustível fóssil, minério, componentes minerais e outros resíduos, possibilitando assim o seu uso direto em processos de produção e equipamentos. A composição química, física e resistência dos briquetes deve estar conforme algumas condições dada a sua finalidade. A composição química e o tamanho dos briquetes são definidos antes da operação de briquetagem, os ensaios que descrevem a resistência mecânica dos briquetes se tornam importantes para a qualidade. O conhecimento dos ensaios possibilita a avaliação da capacidade dos briquetes permanecerem intactos a certos esforços que são submetidos durante seu uso, desta maneira determinando seu valor comercial e viabilidade de sua utilização em diferentes usinas metalúrgicas nas condições intrínsecas para essas fábricas (EREMIN; BABANIN; KOZLOVA, 2003).

O ensaio de tamboramento ou degradação granulométrica a frio visam reproduzir e adquirir dados por meio de situações pelas quais os briquetes em sua forma natural experimentam, como transporte, manuseio, cominuição e carregamento. Desta forma, o ensaio é realizado ao inserir o briquete em um tambor que rotaciona e ao final a amostra é peneirada, determinando o índice de tamboramento (FARIA, 2008; COSTA, 2020; LEÃO, 2021).

O ensaio de resistência ao impacto revela a resistência do briquete em sofrer repetidas quedas e permanecer íntegro de forma a não prejudicar o seu uso. Uma forma de calcular esta propriedade é por meio do ensaio de queda livre. A resistência ao impacto é dita de acordo com o número de quedas seguidas que um briquete realiza sem se fragmentar. Sabe-se a existência de briquetes curados à quente e à frio, sendo 10 e 3 quedas respectivamente para cada cura, bons valores (BY, 2017; CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018).

A densidade de um briquete reflete a sua resistência, visto que uma densidade elevada é justificada pelo aumento de compactação de partículas, colaborando com o transporte e estocagem. Além disso, aglomerados menos densos ou mais porosos permitem uma maior permeabilidade do leito de partículas. A obtenção da densidade aparente de um briquete pode ser feita por meio do cálculo da divisão do volume do briquete por sua massa, e o quociente destes será o resultado (BHATTACHARYA; SETT; SHRESTHA, 1989; MANTOVANI; TAKANO; BÜCHLER, 2002; CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018).

A crepitação é a degradação granulométrica de minérios, proveniente de um aquecimento rápido simulando o topo dos fornos durante a alimentação (FARIA, 2008; BARBOSA, 2021). As possíveis causas da crepitação no minério de manganês podem ser pela mudança de volume do minério, ocorrida devido à perda de água estrutural em minérios hidratados e pela decomposição térmica de alguns óxidos menos estáveis (YOSHIKOSHI et al., 1984; FARIA, 2008). Os minérios de manganês apresentam comportamento frágil quando suscetíveis a elevação de temperatura em ambiente redutor. Minérios com alto valor de porosidade, exibem uma proporção maior na geração de finos, causando a retenção de água que por consequência traz uma menor resistência mecânica (TANGSTAD, 2013).

O tempo de armazenamento é tratado por By (2017) ao realizar ensaios de impacto de briquetes de cal e melaço após decorrerem cinco semanas em um grupo e duas semanas em outro, durante o armazenamento, não foram constatadas diferenças significativas entre as duas condições experimentais. Entretanto ao mudar o aglomerante para bentonita, By (2017) obteve briquetes que geraram mais finos para cada semana de armazenamento apesar de desvios serem evidenciados na segunda semana.

3.3 Aglomerantes

Pietsch (2002) define aglomerantes como sendo componentes adicionados no processo de aglomeração visando o aumento de resistência do produto aglomerado, minimizando interferências químicas no processo de redução. Os aglomerantes podem ser classificados em espécimes orgânicos (Albuminas, Carboxi Metil Celulose(CMC), Alginatos, Melaços, Gelatinas, Resinas), e inorgânicos(Bentonita, Alumina Coloidal, Cimentos, Cal hidratada, Silicatos) (EISELE; KAWATRA, 2003).

Para os aglomerantes serem considerados adequados, é preciso que não libere elementos danosos ao meio ambiente e nem deletérios metalurgicamente ao aço, tais como P, S, As etc. Além disso, deve-se evitar o aumento de impurezas como a sílica, mantendo as excelentes propriedades metalúrgicas do briquete, como alta redutibilidade, pouco inchamento e pouca queda de pressão durante a redução. O custo do ligante deve ser aceitável para a produção de briquetes e de fácil disponibilidade no mercado (SAH; DUTTA, 2010; DUTTA; GHOSH, 1994).

3.3.1 Bentonita

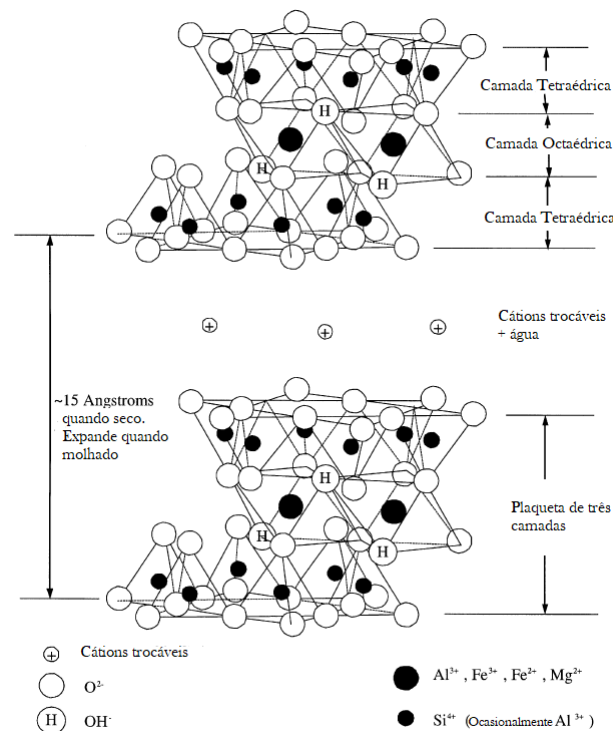
A bentonita é uma argila do grupo mineral dos filossilicatos, que deriva da palavra grega para “folha”. Este grupo de minerais apresenta folhas tetraédricas de SiO_4 , dispostas de várias formas e com variedade de contra-íons que neutralizam a sobrecarga das folhas, permitindo a união das folhas na forma de camadas. Essas camadas são fracamente ligadas e podem ser facilmente separadas na presença de umidade elevada. Quando em contato com a água é formada uma camada espessa, massa plástica ou plaquetas finamente divididas, e com a secagem da água presente nesta estrutura, as placas se aderem mecanicamente ou eletrostaticamente, sendo assim um bom aglomerante de partículas dependente da argila e de sua estrutura (EISELE; KAWATRA, 2003).

Portanto, entre as diversas aplicações da bentonita, destacam-se a aglomeração de areias de fundição, impermeabilização, perfuração de poços de petróleo, *pet litter*, pelotização de minérios entre outros (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010). Em 2017, o Brasil registrou o seguinte cenário de aplicação da bentonita nos setores do mercado interno (OLIVEIRA, 2022):

- Bentonita seca : fabricação de produtos químicos, como graxas e lubrificantes (72,5%); fabricação de produtos cerâmicos, como pisos e revestimentos (16,1%).
- Bentonita ativada : pelotização de minério de ferro (51,0%); fundição (27,6%); e ração animal (11,2%).

Com a predominância do argilomineral Montmorillonita, as partículas variam de $1\mu\text{m}$ à $2\mu\text{m}$ de diâmetro. As placas de esmectita possuem espessura de até 1nm e diâmetro de 100nm . O empilhamento é regido por forças polares e de van der Waals, existindo vazios interlamelares (SILVA; FERREIRA, 2008). Para Luz, Sampaio e França (2010) o argilomineral bentonita possui estrutura constituída de camadas de íons coordenados octaedralmente, dividida em duas camadas de íons coordenados tetraedricamente, como apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Estrutura da bentonita.



Fonte: Adaptado de Eisele e Kawatra (2003)

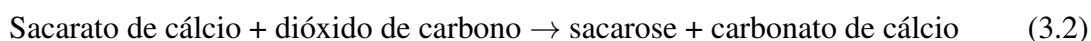
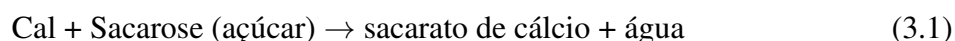
3.3.2 Cal hidratada e Melaço

Melaço pode ser definido como o produto efluente final na preparação de cristalização do açúcar. Fatores de produção como quantidade, qualidade (composição) fornecem informações que definem o tipo de melaço (OLBRICH, 2006). Dentre os componentes principais do açúcar, cita-se os não recuperados durante o processamento da cana, as proteínas e os diferentes minerais inorgânicos encontrados na cana de açúcar (HALT; KAWATRA, 2017).

O melaço da cana, por sua vez, possui aplicação em campos diferentes, como matéria prima para fertilizantes agrícolas não tóxicos, como fonte de energia para suinocultura devido a riqueza de açúcar, no emprego em cerâmicas como isolante térmico, como colapsibilizante na aglomeração de areias de fundição, para evitar trincas. É ressaltado o seu poder aglutinante que possibilita a produção de papelão, confecção de moldes de fundição e aditivos para conformação de materiais refratários e cerâmicos em geral (BRASILEIROS, 2022).

No contexto mínero-metalúrgico, Jesus (2020) abordou o uso do melaço como aglomerante em briquete de finos de minério de manganês com ou sem adição de coque. O autor destacou que essa configuração apresentou o melhor desempenho em ensaios de redução justificado pela formação de maior número de poros originados da decomposição do melaço. De forma alternativa, By (2017) utilizou a combinação dos aglomerantes cal hidratada e melaço em diferentes proporções, obtendo valores significativos de resistência ao impacto para uma proporção de 4% de cal hidratada e 8% de melaço em briquetes de finos de minério de manganês.

Atualmente, a cal hidratada tem sido utilizada com o melaço de cana atuando como aglomerante. Esses dois compostos reagem quimicamente possibilitando o uso. As reações químicas estão apresentadas nas Equações 3.1 e 3.2. O produto da reação cal e sacarose forma um complexo de sacarato de cálcio na Equação 3.1, que em contato com CO_2 forma o carbonato de cálcio e sacarose recristalizada representada na Equação 3.2 (HALT; KAWATRA, 2017).



3.4 Aplicação de finos de minérios na elaboração de briquetes

A fim de possibilitar o uso de finos de minérios de manganês em fornos elétricos e garantir a produtividade, Barbosa (2021), usou o método de aglomeração por briquetagem para recuperar as partículas finas utilizando como aglomerante o cimento Portland. Avaliou-se o comportamento das variáveis por planejamento experimental de acordo com a pressão de compactação, tempo de cura, porcentagem de aglutinante e substituição de parte do minério de manganês por rejeito, todos variando em dois níveis. Os ensaios de qualidade realizados foram resistência à compressão, à abrasão e ao impacto e absorção e resistência à água. Além de caracterização química-estrutural, determinação do tempo de armazenamento e crepitação para as melhores combinações de composição.

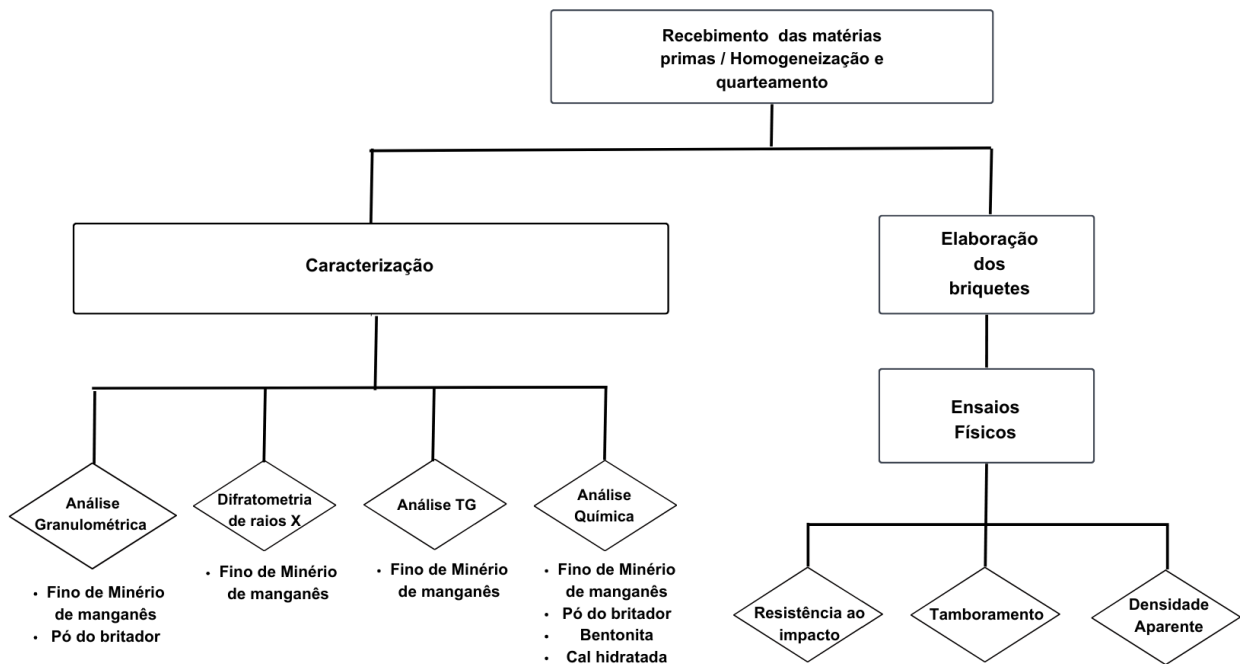
Jesus (2020) avaliou o desempenho de briquetes de finos de minério de manganês no processo de pré-redução, variando em três diferentes composições de briquetes, uma composição utilizando o melaço, outra com melaço e coque e uma terceira com bentonita como ligante. Briquetes verdes e pré-reduzidos foram examinados por resistência à compressão, porosidade, difração de raio X. Resultados concluíram que briquetes aglomerados com melaço iniciam a redução em temperaturas inferiores e obtém maior resistência ao desgaste por aquecimento do que minérios granulados. A viabilidade do uso de briquetes em fornos elétricos a arco submerso foram comprovados ao apresentarem melhor desempenho, em especial os briquetes que possuem melaço como ligante, que apresentaram maior resistência à compressão.

O trabalho de By (2017) utilizou de finos de minério de manganês na briquetagem com ligantes do tipo, cal/melaço, lignosulfonato de magnésio e bentonita de baixa dosagem para a produção de briquetes utilizando as técnicas de prensagem uniaxial e prensagem de rolos. Os ligantes foram testados no estado verde dos briquetes produzidos por prensagem uniaxial, concluindo que o aumento das dosagens de cal hidratada/melaço da cana e lignossulfonato produziram a briquetes de resistência maior. Concluíram também que o uso de prensagem de rolos é viável quando estes briquetes passam por tratamento térmico com um intervalo de temperatura de 105°C a 300°C.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho foi realizada seguindo três etapas. A primeira etapa ocorreu o recebimento das matérias primas (fino de minério de manganês, pó do britador, bentonita, cal hidratada e melão da cana) e sua homogeneização e quarteamento. A segunda etapa se dividiu em duas partes, uma destinada a caracterização dos finos do minério, pó do britador e aglomerantes, e outra parte a confecção dos briquetes. A etapa final constituiu os ensaios físicos dos briquetes, afim de analisar a qualidade.. A Figura 5 apresenta um fluxograma com as etapas sugeridas para a elaboração de briquetes.

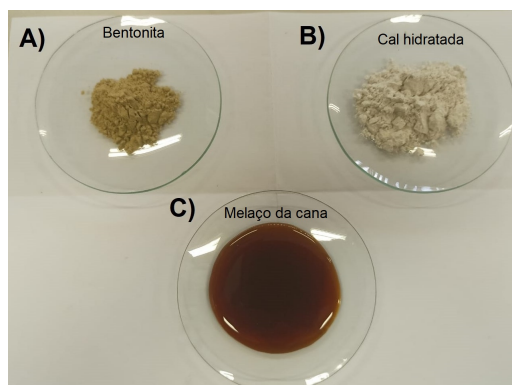
Figura 5 – Fluxograma da metodologia de preparo dos briquetes.



4.1 Finos de minério de Manganês e aglomerantes

A carga metálica utilizada foi o fino do minério de manganês e o pó do britador coletado e classificado na empresa localizada nas proximidades de São João del Rey (Minas Gerais). Os aglomerantes utilizados foram bentonita, cal e melão da cana como composição dos briquetes apresentados na Figura 6. A bentonita e a cal hidratada foram homogeneizada e quarteada pelo método da pilha alongada dando origem a uma massa representativa utilizada nos briquetes.

Figura 6 – Aglomerantes (Bentonita, Melaço e Cal Hidratada).



4.2 Caracterização da matérias-primas

As matérias primas recebidas foram homogeneizadas e quarteadas e submetidas à caracterização por meio de diferentes técnicas. A análise granulométrica via peneiramento a úmido, análise termogravimétrica e difração de raios-X foi realizada para o fino de minério de manganês, e a análise química foi feita para todas as matérias primas ambas. O método de quarteamento inicial foi definido pela massa e volume inicial recebido diretamente da empresa fornecedora e seguiu o método de quarteamento em pilha longitudinal e quarteador do tipo Jones, possibilitando o material para as etapas subsequentes de análise e produção de briquetes.

4.2.1 Peneiramento a Úmido do fino de minério de manganês

Realizou-se o peneiramento no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (DEMIN- UFOP). A amostra foi alimentada no peneirador vibratório (Figura 7). Inicialmente foi escolhida a série Tyler (aberturas de 6,3mm, 5,6mm, 3,35mm, 2,38mm, 1,68mm, 0,85mm, 0,6mm, 0,425mm, 0,3mm, 0,212mm, 0,15mm, 0,106mm, 0,062mm, 0,053mm e 0,037mm) de peneiras para o procedimento, e o material passante em $37\mu\text{m}$ foi destinado ao granulômetro a laser Cilas 1064, no Laboratório de Propriedades Interfaciais (DEMIN/UFOP).

Figura 7 – Peneirador vibratório.



4.2.2 Difração de raios-X

A composição mineralógica foi determinada qualitativamente por meio da difração de raios X pelo método do pó total, utilizando o difratômetro de raios X com tubo de cobre (PanAnalytical, modelo X'Pert3 Powder), pertencente ao Laboratório de Microscopia Ótica e Difração de Raios X (DEMIN – UFOP).

4.2.3 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TG) foi obtida por meio do equipamento TA Q50 (da marca TA Instruments), no Laboratório de Espectroscopia Infravermelha e Análise Termogravimétrica (DEMIN – UFOP).

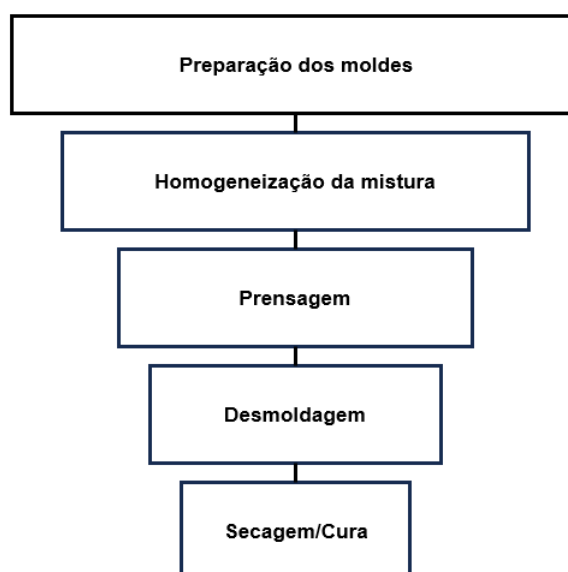
4.2.4 Análise química

A análise química dos elementos e/ou compostos majoritários das amostras foi realizada pelo Laboratório de Tratamento de Análise da unidade de Conselheiro Lafaiete da empresa fornecedora por via úmida (titulometria).

4.3 Produção dos Briquetes

A produção dos briquetes seguiu uma série de procedimentos mostrados no fluxograma da Figura 8 de acordo com cada composição definida previamente. Os moldes foram preparados para receber a mistura homogeneizada das matérias primas, seguindo para a prensagem e desmoldagem em prensa hidráulica produzindo assim o briquete que obedeceu o tempo de secagem.

Figura 8 – Fluxograma da produção dos briquetes.



4.3.1 Mistura da matéria prima e preenchimento de moldes

O procedimento inicial foi a preparação dos moldes metálicos para recebimento da mistura, estes foram higienizados de maneira a não possuir qualquer resíduo de sujeira, umidade ou pontos de oxidação. Em seguida, foi utilizada vaselina sólida, como desmoldante. O procedimento de pesagem das matérias primas individualmente foi feito após a etapa de preparação de moldes, utilizando a balança de precisão SHIMADZU AUT220, Em seguida, um recipiente foi escolhido para realizar a homogeneização das matérias primas (fino do minério de manganês, carvão vegetal, aglomerante e água) até apresentarem visualmente aparência uniforme, por fim o material foi alimentado em cada molde.

4.3.2 Compactação e Secagem

A etapa de compactação envolveu o preenchido do molde (Figura 9) de aço inox cilíndrico (30mm x 30 mm) com a mistura homogeneizada. O conjunto (molde preenchido) para a prensa hidráulica, Figura 10 modelo CI100 toneladas-força (marca SOLOCAP) situada no Laboratório de Reologia (DEMIN/UFOP), onde aplicou-se uma pressão de compactação definida de acordo com o planejamento experimental. A Secagem ou tempo de cura dos briquetes, ocorreu em temperatura ambiente sem qualquer tipo de aporte de calor no Laboratório de Materiais Cerâmicos (DEMIN/UFOP).

Figura 9 – Molde para produção de briquetes.



Figura 10 – Prensa Hidráulica.



4.4 Ensaios Físicos

Os ensaios físicos visa a comparação e efeito da influência dos aglomerantes escolhidos para os briquetes de finos de minério de manganês, foram definidos os ensaios físicos de resistência ao impacto, tamboramento juntamente ao parâmetro densidade aparente.

4.4.1 Resistência ao impacto

O ensaio de resistência ao impacto foi realizado com a adaptação da Norma ASTM D440-07 (2019). Neste caso, o briquete em estudo foi pesado anteriormente ao início do ensaio e foi submetido a duas quedas livres subsequentes, de uma altura de 1,8m, utilizando um anteparo de aço com espessura de 10mm. O material resultante dos dois arremessos foi peneirado em uma peneira de malha $3,35\mu m$, as partículas retidas e passantes nesta malha foram pesadas para avaliação da qualidade. O índice de resistência ao impacto dos briquetes foi calculado utilizando a Equação 4.1 e a Figura 11 representa um esquema do ensaio.

$$IQ = \frac{m_1}{m} \cdot 100 \quad (4.1)$$

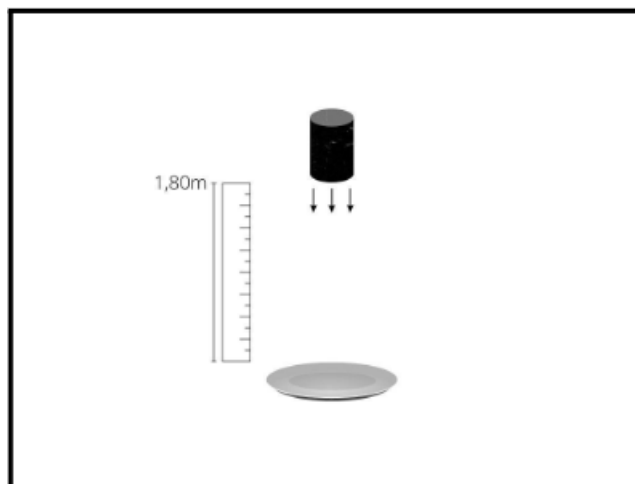
Em que:

IQ = índice de resistência ao impacto (%);

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

m = massa do briquete (g);

Figura 11 – Esquema do ensaio de resistência ao impacto.



4.4.2 Tamboramento

O ensaio de tamboramento ou degradação volumétrica a frio foi realizado com a adaptação da ISO 3271 no Laboratório de Materiais Cerâmicos (DEMIN/UFOP). O tempo de rotação definido foi de 10 minutos com 200 revoluções.

4.4.3 Densidade Aparente

A medida de densidade aparente foi realizada ao se obter as medidas de altura e diâmetro do briquete com o uso de paquímetro e a massa do briquete por meio da balança de precisão SHIMADZU AUT220.

4.5 Ensaio adicional de crepitação após armazenamento

Os ensaios adicionais foram feitos para briquetes produzidos nas condições do ponto central, visando aprofundar a compreensão do comportamento metalúrgico dos briquetes após um período de armazenamento. Os briquetes de finos de minério de manganês foram armazenados em caixas no Laboratório de Materiais Cerâmicos (DEMIN/UFOP) no período de 6 meses a partir de sua produção. Os aglomerados foram separados em dois lotes, que se diferenciavam pelo aglomerante bentonita e cal hidratada/melaço, inicialmente foi avaliado o aspecto visual como cor, dimensões e surgimento de trincas e em seguida foi conduzido para o ensaio de crepitação.

O ensaio de crepitação foi realizado conforme adaptação da norma ISO 8731 assim como realizado no trabalho de Faria (2008). Desta maneira, o ensaio foi realizado com auxílio de dois recipientes de aço com tampas (Figura 12), onde os briquetes foram introduzidos no forno tipo mufla com atmosfera ambiente até a temperatura de 700°C durante 30min, situado no Laboratório de Reologia (DEMIN/UFOP) (FARIA, 2008; BARBOSA, 2021). O cálculo do índice de crepitação para a malha em análise de 6,3mm é feito por meio da Equação 4.2.

$$DI_{(malha)} = \frac{m_2}{m_1} \cdot 100 \quad (4.2)$$

Em que:

$DI_{(malha)}$ = Índice de crepitação para a malha em análise;

m_1 = massa em gramas do briquete após o tratamento térmico;

m_2 = massa em gramas da fração passante na malha de 6,3mm.

Figura 12 – Recipientes com briquetes para ensaio de crepitação.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.6 Planejamento Experimental

O planejamento experimental foi definido para a realização dos testes com uma quantidade de ensaios que assegurassem a obtenção de dados confiáveis e significativos. Planejamento fatorial é um método estatístico, que apresenta a influência de variáveis experimentais relevantes, junto a suas interações para determinada resposta. Em uma análise hipotética composta por k fatores em dois níveis distintos, tem-se a configuração de um conjunto composto por 2^k experimentos (TEÓFILO; FERREIRA, 2006; NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010; BARBOSA, 2021).

Este trabalho analisou a influência de 3 variáveis (pressão de compactação, tempo de cura e tipo de aglomerante), cada uma em dois níveis. Os ensaios foram realizados de acordo com um planejamento fatorial completo 2^3 com triplicata no ponto central, com o auxílio do software MINITAB 19®. Os níveis utilizados para cada variável foram: pressão de compactação (25MPa e 80MPa), tempo de cura (4 dias e 18 dias), porcentagem de bentonita (3% e 12%) e porcentagem de cal hidratada/melaço (12% e 18%). A ordem dos experimentos e os níveis utilizados estão apresentados na Tabela 3 e 4.

Tabela 3 – Planejamento experimental fatorial completo 2^3 com triplicata no ponto central utilizado para cada aglomerante.

Testes	Ordem	Pressão e compactação(MPa)	% Aglomerante	Tempo de cura (dias)
1	5	+1	-1	+1
2	2	-1	-1	+1
3	1	+1	-1	-1
4	4	-1	+1	+1
5	10	+1	+1	+1
6	8	+1	+1	-1
7	6	-1	-1	-1
8	7	-1	+1	-1
9	9	0	0	0
10	11	0	0	0
11	3	0	0	0

Tabela 4 – Níveis, variáveis e valores.

Nível e Variáveis	Valores		
Nível	-1	0	+1
%Aglomerante (Bentonita)	3	7,5	12
%Aglomerante (Cal hidratada/Melaço da Cana)	12	15	18
Pressão e compactação(MPa)	25	52,5	80
Tempo de cura (dias)	4	11	18

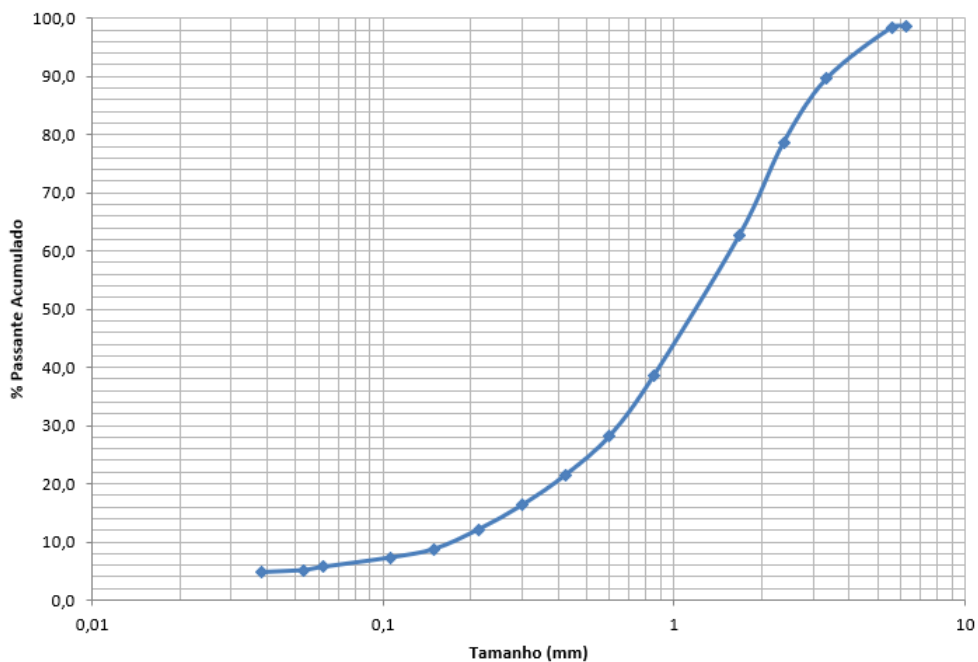
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização das matérias primas

5.1.1 Análise granulométrica

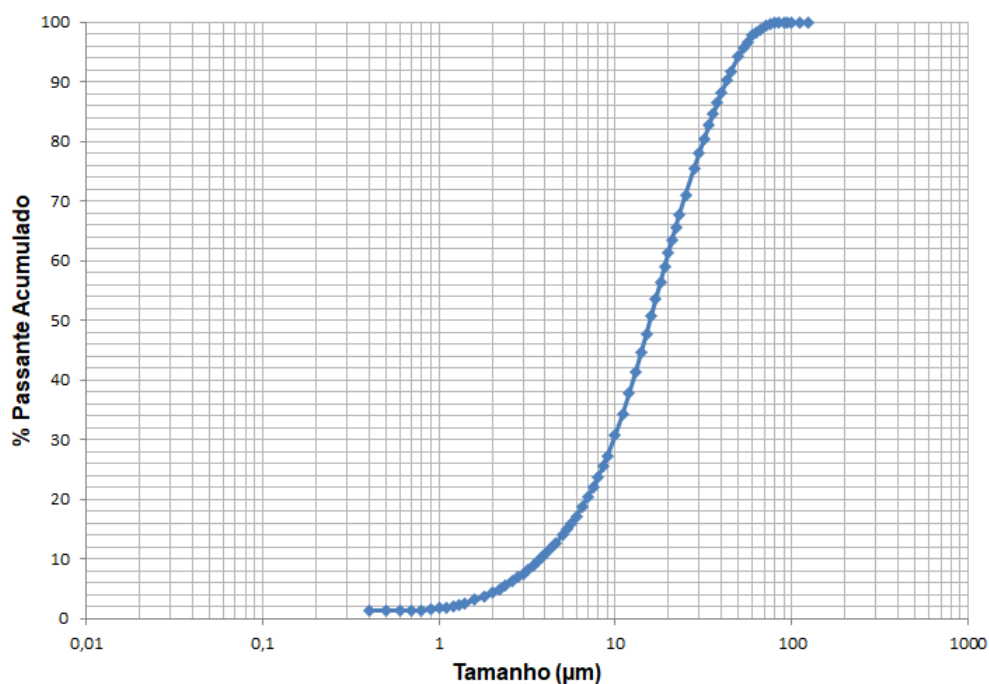
A análise realizada no fino de minério de manganês gerou a curva de análise granulométrica apresentado na Figura 13. É possível constatar que a amostra apresenta uma faixa de distribuição ampla, em que 90% das partículas se encontram abaixo de 3,20mm(D90) e 50% abaixo de 1,30(D50). Ainda, é possível observar uma parcela de partículas com granulometria abaixo de 0,2mm, classificadas como partículas adesivas, representando 12% e nucleantes na faixa de 1,0mm a 3,0mm representando 42% da amostra. Essa composição é importante para favorecer a interação entre as partículas de granulometria melhorando a compactação dos aglomerados como observado por Pan et al. (2016), Barbosa (2021).

Figura 13 – Distribuição granulométrica do fino de minério de manganês



O pó do britador também foi analisado e é apresentado na Figura 14, na qual a granulometria está na faixa de $0,4\mu\text{m}$ a $125\mu\text{m}$, classificando como partículas nucleantes para a briquetagem. O (D90) é de $48,6\mu\text{m}$, e o (D50) é aproximadamente $16\mu\text{m}$.

Figura 14 – Distribuição granulométrica do pó do britador.



5.1.2 Caracterização Química

Na Tabela 5 apresenta o resultado da análise química do fino de minério de manganês, do pó do britador e dos aglomerantes cal hidratada e bentonita, em que foram determinados os teores de Mn, Fe, SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO e P.

O teor de manganês é de 28,29% no fino de minério de manganês e de 34,77% no pó do britador, indicando uma abundante fonte alternativa deste elemento. O teor de SiO₂ é objeto de interesse, visto que a sílica se torna escória no processo de produção de ferro ligas de manganês.

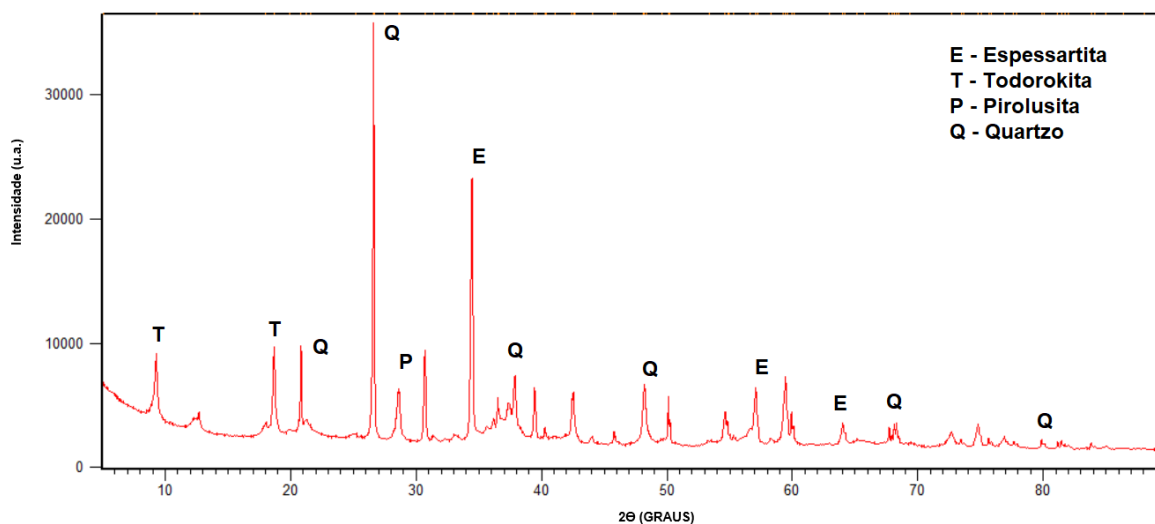
Tabela 5 – Análise Química

Material	%Mn	%Fe	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%CaO	%MnO	%P
Fino de Minério de Manganês	26,29	6,78	19,60	10,32	-	-	0,101
Pó do Britador	34,77	11,36	14,77	-	-	-	0,128
Cal hidratada	-	0,85	6,00	1,81	52,94	0,61	0,071
Bentonita	-	1,64	48,20	6,24	4,37	4,61	-

5.1.3 Análise DRX

A técnica de difratometria de raios X permitiu a identificação de 4 minerais que compõem o minério de manganês avaliado, a espessartita (E), todorokita(T), pirolusita(P) e quartzo(Q) representados e nomeados na Figura 15.

Figura 15 – Difratoograma de raios X do fino de minério de manganês.



A espessartita é um mineral do grupo dos nesossilicatos, sendo representado pela fórmula química $Mn^{2+}_3Al_2(SiO_4)_3$, um silicato de manganês e alumínio, possuindo uma rede constituída por tetraedros SiO_2 e octaedros Al_3O_6 , que possibilita os átomos de manganês situarem nos interstícios da rede, e representando assim até 45% de MnO da composição química. A pirolusita é um óxido MnO_2 de importância para o minério de manganês, e comumente é associado ao quartzo e outros minerais de manganês como hollandita, jacobsita, psilomelano, criptomelano, hausmannita, braunita, todorokita, chalcophanita, alabandita, bixbyita e rhodonita. A todorokita $(Ca,Na,K)(Mn^{2+}Mn^{4+})_6O_{12} \cdot xH_2O$ também encontrada na análise é um óxido de manganês e ocorre em pegmatitos que se associa também ao quartzo. O mineral quartzo é um tectosilicato composto pelos elementos Si e O, e apresenta SiO_2 como fórmula química, sendo o mineral ganga do minério de manganês analisado (FARIA, 2008; BARBOSA, 2021; CHELONI; LOPES; REIS, 2023).

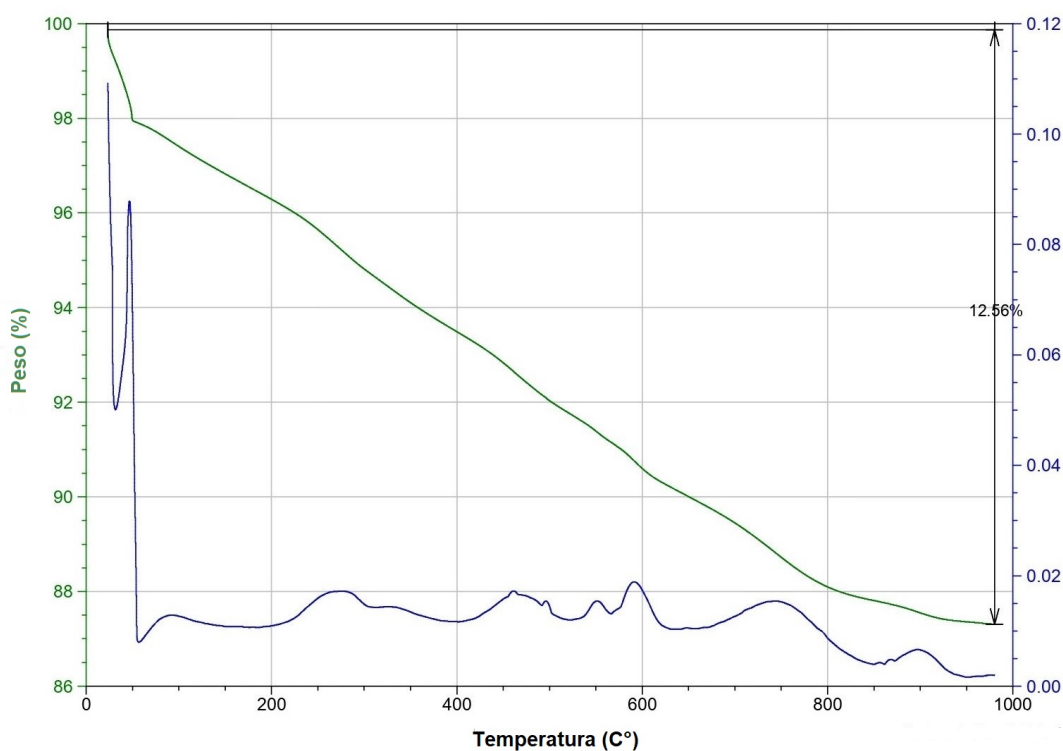
5.1.4 Análise Termogravimétrica

A Figura 16 apresenta a curva de perda de massa em função da temperatura (25°C a 1000°C) para o fino de Totonho. No intervalo de temperatura de 25°C a 250°C, evidencia o início de perda de massa, representando 5% aproximadamente da massa inicial que pode estar relacionada à perda de umidade por evaporação da água.

A partir dos perfis de perdas exibidos entre a faixa de 250°C a 450°C, pode-se deduzir que ocorre uma decomposição térmica equivalente a 3% de perda de massa na condição inicial, possivelmente provocada por transformações estruturais, devido a água estruturalmente ligada na estrutura cristalina da todorokita, mineral hidratado identificado na análise de difratometria de raios X.

Conforme a temperatura se eleva, a probabilidade de transformação da todorokita e dos minerais pirolusita também presentes na amostra é favorecida. As transformações ocorrem nas seguintes temperaturas: de MnO_2 para Mn_2O_3 a 535°C, de Mn_2O_3 para Mn_3O_4 a 933°C e de Mn_3O_4 para MnO a 1160°C (FARIA, 2008; REIS, 2010; COSTA, 2020).

Figura 16 – Análise termogravimétrica do fino de minério de manganês.



5.2 Qualidade dos briquetes

As Tabelas 6 e 7 exibem as respostas para as variáveis resistência ao impacto(RI), densidade média(DM) e tamboramento, de acordo com cada variável independente, pressão de compactação(PC), porcentagem de aglomerante e tempo de cura. As análises dos efeitos principais e do gráfico de pareto das variáveis independentes nas respostas serão apresentados nas próximas seções deste capítulo.

Tabela 6 – Resultados para o aglomerante bentonita.

Ensaio	PC(MPa)	Tempo de cura(dias)	% aglomerante	RI	Tamboramento	DM
A	+1	-1	+1	99,83	98,81	2,17
B	-1	-1	+1	99,82	98,83	2,03
C	+1	-1	-1	81,46	93,81	2,12
D	-1	+1	+1	99,84	98,70	2,04
E	+1	+1	+1	99,91	98,70	2,18
F	+1	+1	-1	91,98	96,56	2,12
G	-1	-1	-1	85,45	94,19	2,00
H	-1	+1	-1	85,36	94,11	1,87
I	0	0	0	99,91	98,44	2,13
J	0	0	0	99,88	98,38	2,10
K	0	0	0	99,89	98,13	2,12

Tabela 7 – Resultados para o aglomerante cal hidratada/melaço da cana.

Ensaio	PC(MPa)	Tempo de cura(dias)	% aglomerante	RI	Tamboramento	DM
L	+1	-1	+1	91,36	99,43	2,07
M	-1	-1	+1	87,64	99,44	2,04
N	+1	-1	-1	82,93	97,62	2,07
O	-1	+1	+1	91,43	96,91	1,89
P	+1	+1	+1	99,98	98,36	1,97
Q	+1	+1	-1	93,87	98,91	2,02
R	-1	-1	-1	77,09	98,43	1,98
S	-1	+1	-1	92,92	98,67	1,90
T	0	0	0	94,37	95,95	1,89
U	0	0	0	94,52	97,74	1,93
V	0	0	0	94,11	96,49	1,90

5.2.1 Resistência ao impacto

- Bentonita

De acordo com o gráfico de Pareto (Figura 17), todas as variáveis envolvidas e suas interações tiveram significância na variável resposta resistência ao impacto, sendo a porcentagem de bentonita a variável que mais influencia na resistência ao impacto. Analisando os gráficos de efeitos principais (Figura 18), os níveis superiores de porcentagem de bentonita (12%) e tempo de cura (18 dias) tiveram as melhores respostas. Este comportamento foi semelhante ao encontrado por Barbosa (2021), que elaborou briquetes de finos de minério de manganês aglomerados com cimento Portland. A bentonita é um aglomerante tipo filme inativo ou tipo matriz inativa. Sua ação ocorre quando o mineral montmorilonita incha ao entrar em contato com a água. As plaquetas dessa argila expandida se unem fortemente umas às outras por ligação eletrostática. Conseqüentemente, à medida que a argila seca, ela confere resistência mecânica significativa ao aglomerado (EISELE; KAWATRA, 2003).

Figura 17 – Gráfico de Pareto da variável resposta resistência ao impacto (Bentonita).

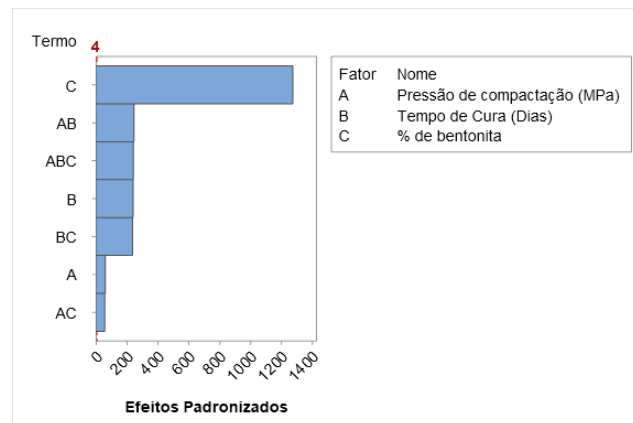
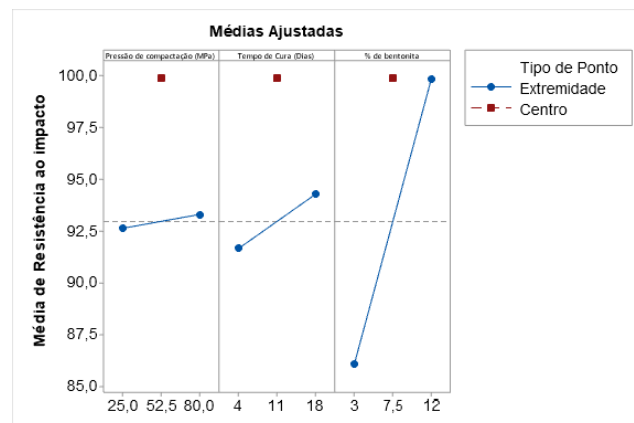


Figura 18 – Gráfico de efeitos principais da variável resposta resistência ao impacto (Bentonita).



- Cal hidratada/Melaço da cana

O gráfico de Pareto indicado pela Figura 19 mostra que as variáveis tempo de cura, porcentagem de cal hidratada e melaço, seguida da pressão de compactação tiveram as maiores influências na resistência ao impacto. Corroborando com o gráfico de efeitos principais (Figura 20), em que percebe-se que um aumento das três variáveis, proporciona um aumento na resistência.

Figura 19 – Gráfico de Pareto da variável resposta resistência ao impacto (Cal hidratada/Melaço da cana).

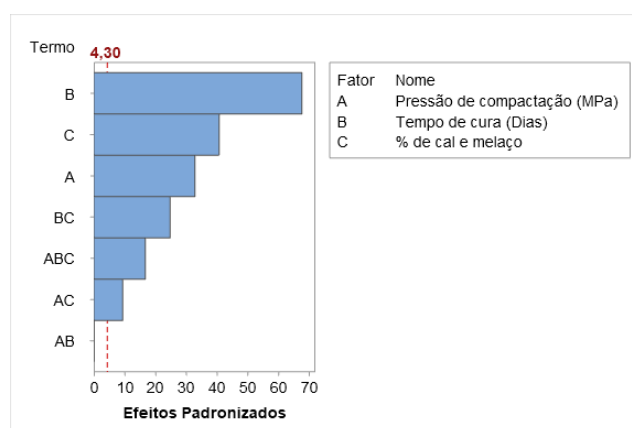
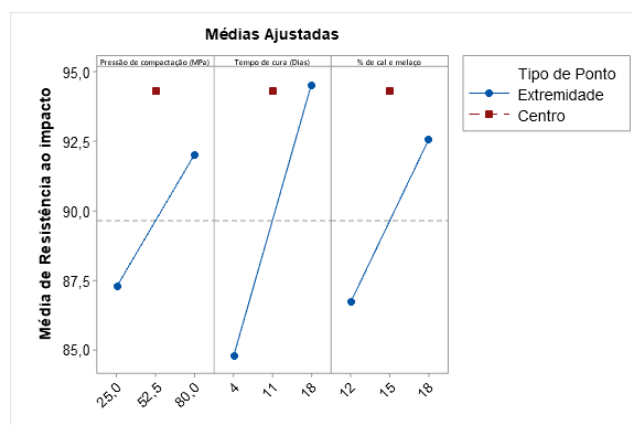


Figura 20 – Gráfico de efeitos principais da variável resposta resistência ao impacto (Cal hidratada/Melaço da cana).



A partir da análise, percebe-se que os maiores valores de resistência ao impacto (acima de 94,00) dos briquetes produzidos com cal hidratada e melaço são alcançados para maiores tempos de cura (11 dias e 18 dias) e maiores adições de aglomerante. A combinação de cal hidratada e melaço desempenha o papel de um aglomerante tipo matriz química (EISELE; KAWATRA, 2003; SAH; DUTTA, 2010). O mecanismo de atuação se baseia na formação de uma rede de carbonato de cálcio, a partir da reação do cálcio com a sacarose do melaço (BY, 2017). Assim, o tempo de cura deve ser suficiente para produção da rede responsável pela união das partículas.

- Comparação RI (Bentonita) x RI (Cal/Melaço)

Os briquetes elaborados com o aglomerante bentonita obtiveram destaque ao apresentarem uma média geral de resistência ao impacto de 94,85 maior que os briquetes elaborados com a cal hidratada/melaço da cana com média de 90,93. Assim observando que briquetes de bentonita possuem uma tendência a resistir mais a quedas, independente das composições propostas.

5.2.2 Tamboramento

- Bentonita

Analisando o gráfico de Pareto (Figura 21), a variável porcentagem de bentonita foi mais significativa para a resistência ao tamboramento. Na avaliação dos efeitos principais (Figura 22), adições maiores que o nível de 3% de bentonita e maiores tempos de cura proporcionaram maiores valores de resistência ao tamboramento. Conforme discutido para a resistência ao impacto, a utilização do nível superior da porcentagem de bentonita de 12% e do tempo de cura de 18 dias favoreceu a geração de uma conexão mais forte entre as partículas, produzindo um briquete mais coeso e resistente.

Figura 21 – Gráfico de Pareto da variável resposta tamboramento (Bentonita).

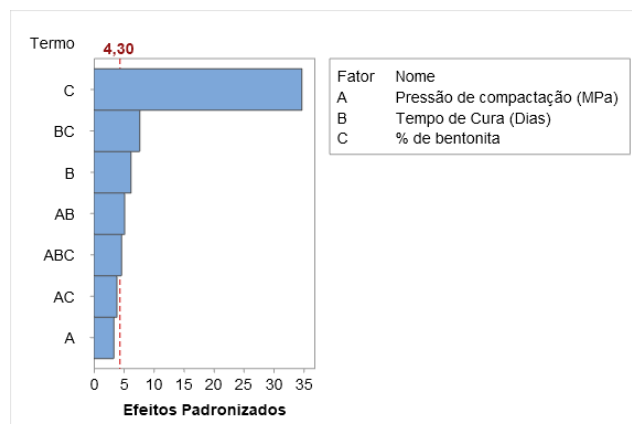
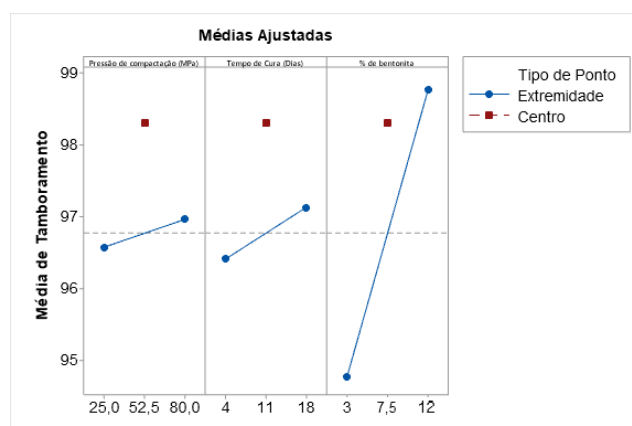


Figura 22 – Gráfico de efeitos principais da variável resposta tamboramento (Bentonita).



- Cal hidratada/Melaço da cana

Ao analisar as Figuras 23 e 24, observou-se que nenhuma variável exerceu influência significativa sobre a variável resposta, apesar de maiores níveis de pressão de compactação e de porcentagem de cal hidratada/melaço apresentarem maiores resultados de tamboramento..

Figura 23 – Gráfico de Pareto da variável resposta tamboramento (Cal hidratada/Melaço da cana).

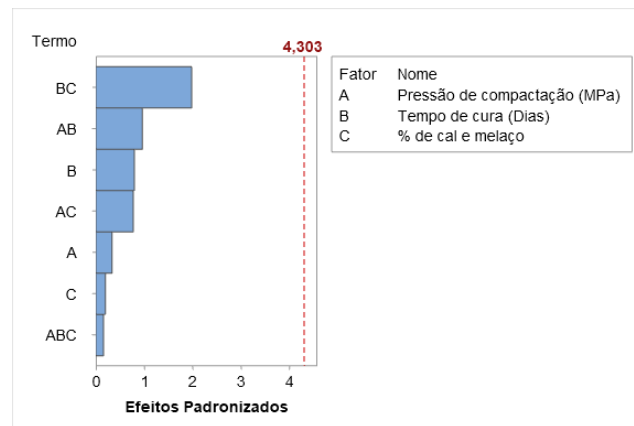
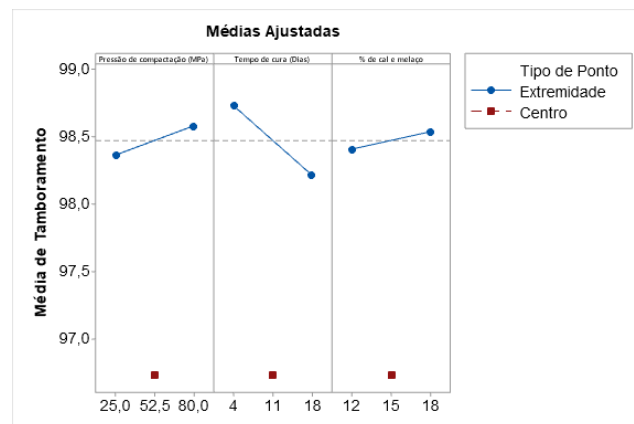


Figura 24 – Gráfico de efeitos principais da variável resposta tamboramento (Cal hidratada/Melaço da cana).



- Comparação Tamboramento (Bentonita) x Tamboramento (Cal/Melaço)

Os resultados obtidos pelos briquetes elaborados com cal hidratada e melaço obtiveram uma média superior em comparação com os briquetes de bentonita. Ressalta-se ainda que o gráfico de pareto da variável resposta tamboramento (Cal hidratada/Melaço da cana) demonstre que nenhum dos fatores pressão de compactação, porcentagem de aglomerante e tempo de cura exerçam significância sobre os resultados.

5.2.3 Densidade

- Bentonita

Para a densidade aparente média, as variáveis que influenciaram foram pressão de compactação e porcentagem de bentonita (Figura 25). Essa informação pode ser confirmada no gráfico de efeitos principais (Figura 26), em que o aumento na pressão de compactação de 25MPa para 80MPa e na porcentagem de bentonita, resulta em maiores valores de densidade aparente média. Quanto à pressão de compactação aplicada na mistura, o esforço compressivo deve ser suficiente para diminuir a distância entre as partículas e assim maximizar as forças intermoleculares responsáveis pela coesão (LEMOS et al., 2019). Portanto, ao aumentar a pressão de compactação, o aglomerado se torna mais compacto e mais denso. As condições ótimas visando o valor máximo para as variáveis respostas resistência ao tamboramento e resistência ao impacto foram 25MPa para a pressão de compactação, 4 dias de cura e 12% de bentonita. Neste caso, a variável densidade aparente foi mantida constante, uma vez que sua maximização pode impactar na porosidade do briquete e sua minimização pode influenciar na resistência mecânica.

Figura 25 – Gráfico de Pareto da variável resposta densidade (Bentonita).

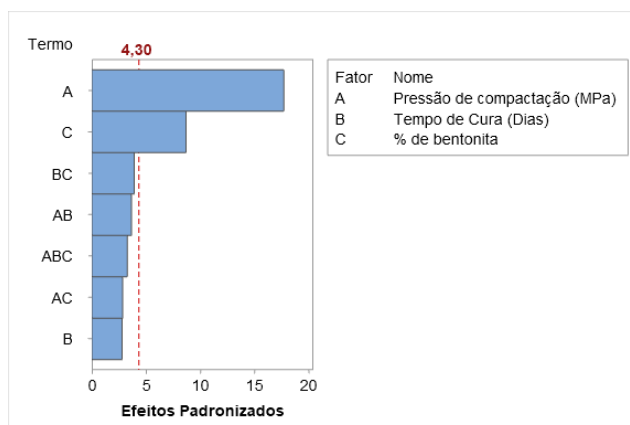
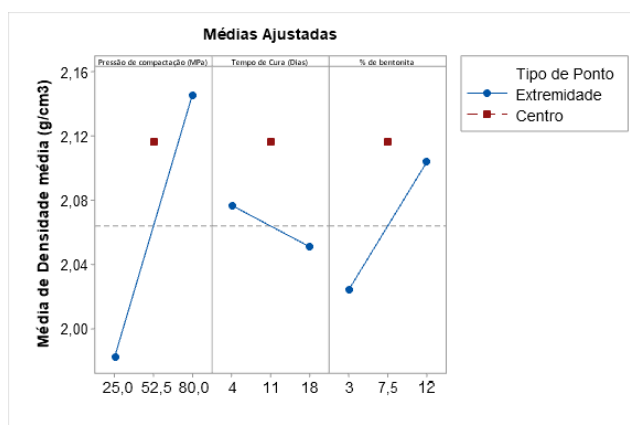


Figura 26 – Gráfico de efeitos principais da variável resposta densidade (Bentonita).



- Cal hidratada/Melaço da cana

Por meio da análise do gráfico de Pareto (Figura 27) observa-se que apenas as variáveis tempo de cura e pressão de compactação foram significativas na medida de densidade aparente. Analisando o gráfico de efeitos principais (Figura 28), percebe-se que em maiores tempos de cura de 18 dias ocorre uma diminuição da densidade, possivelmente causada pela secagem do aglomerado. Já o aumento da pressão de compactação para valores próximos a 80MPa produz um aglomerado mais compacto, de maior densidade, conseqüentemente de menor porosidade. Esse aumento de pressão de compactação deve ser cuidadosamente analisado, uma vez que poderá impactar na redutibilidade dos briquetes (LEMOS et al., 2019).

Figura 27 – Gráfico de Pareto da variável resposta densidade (Cal hidratada/Melaço da cana).

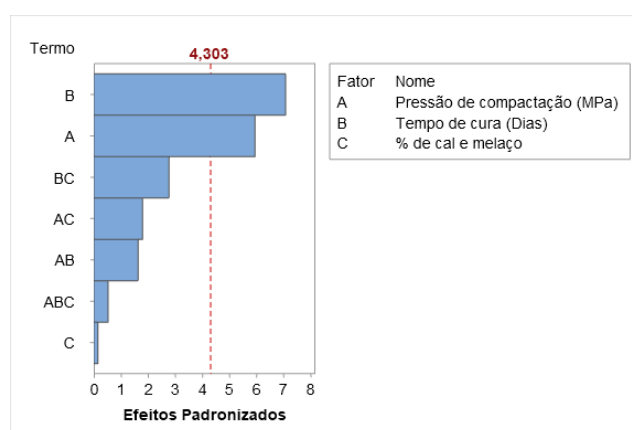
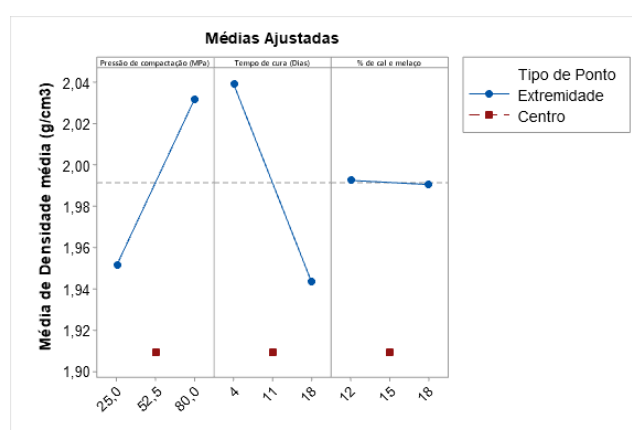


Figura 28 – Gráfico de efeitos principais da variável resposta densidade (Cal hidratada/Melaço da cana).



- Comparação DM (Bentonita) x DM (Cal/Melaço)

A média das densidades avaliadas foram de $2,078\text{g/cm}^3$ para briquetes com bentonita e $1,969\text{g/cm}^3$. O fator de relevância para ambos é a pressão de compactação, ainda que o fator porcentagem de bentonita seja influente para os briquetes elaborados com este aglomerante, e o fator tempo de cura seja influente para briquetes de cal/melaço. Desta forma, observa-se um melhor desempenho para a densidade dos briquetes com bentonita.

5.3 Análises adicionais

5.3.1 Análise visual do briquete devido ao tempo de armazenamento

As Figuras 29.a e 29.b apresentam briquetes de fino de minério de manganês aglomerado com bentonita e cal hidratada e melaço nas condições do ponto central do planejamento ($52,5\text{MPa}$, 11 dias e $7,5\%$ para bentonita e 15% cal/melaço). Observa-se o surgimento de mofo nos em todos os briquetes e em maior quantidade naqueles que utilizaram a cal hidratada e o melaço como aglomerante.

By (2017) percebeu que briquetes elaborados com de cal hidratada e melaço que foram armazenados ao longo de 2 meses em local com ar de baixa umidade não desenvolveram fungos. Desta forma, a umidade foi essencial para o desenvolvimento de fungos, fator que somado ao valor nutritivo do melaço acarreta no mofo em briquetes úmidos que não passam por processo de secagem forçada afetando a qualidade. Minérios granulados armazenados com a mesma condição (Figura 30) não apresentaram indícios de crescimento de mofo, de maneira contrária a observada para os briquetes.

Figura 29 – Briquetes armazenados por 6 meses

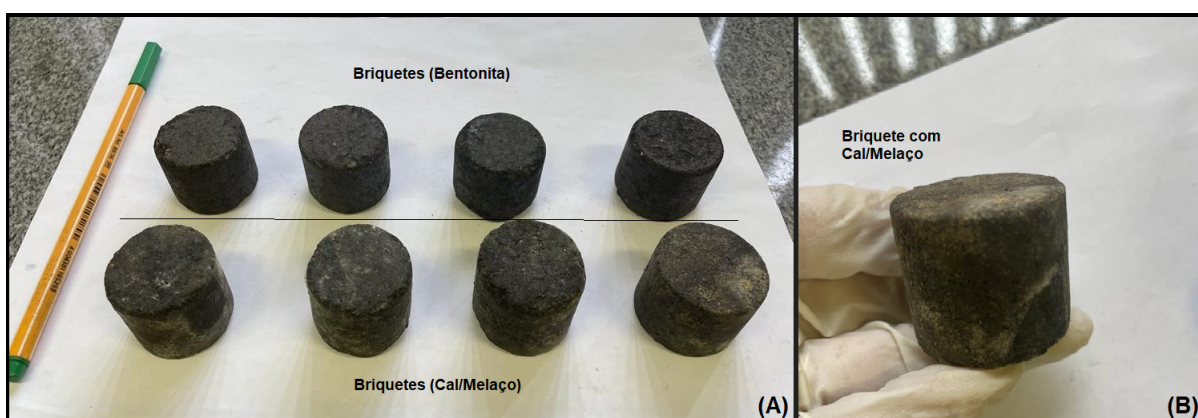


Figura 30 – Granulados armazenados por 6 meses



5.3.2 Crepitação

A Tabela 8 apresenta os índices de crepitação para os briquetes elaborados nas condições do ponto central do planejamento (52,5MPa, 11 dias e 7,5% para bentonita e 15% cal/melaço) e dos minérios granulados, ambos armazenados após o período de 6 meses. A crepitação dos briquetes e do minério granulado foi analisada conforme a massa retida na peneira de 6,3mm. O ensaio 2, utilizando briquetes com bentonita, apresentou um maior que o granulado ao revelar um índice de crepitação próximo à 3% e o minério granulado apresentou um resultado intermediário de 5,74%. Em contra partida, no ensaio 1 referente aos briquetes elaborados com cal hidratada e melaço, o índice de crepitação apresentou valor não desejável, próximo ao do granulado. (CARVALHO, 2014; BARBOSA, 2021).

Tabela 8 – Valores do ensaio de crepitação

Ensaio	Aglomerante	Índice de crepitação
1	Cal hidratada e Melaço	56,69
2	Bentonita	3,96
3	Granulado (Minério de manganês)	5,74

O alto índice de crepitação pode estar vinculado a transformação do minério de manganês durante a elevação de temperatura até 700°C e a fatores como a água estrutural das fases hidratadas (FARIA; JANNOTTI; ARAÚJO, 2012; BARBOSA, 2021).

Entretanto, os valores extremos encontrados para o ensaio 1 também podem estar relacionados a uma maior quantidade de água na fabricação dos briquetes e ao fator armazenamento que promoveu o desenvolvimento de mofo nos briquetes com este aglomerante. Os briquetes elaborados com bentonita tiveram um desempenho próximo ao do minério granulado, sendo um potencial substituto nos fornos elétricos de redução, enquanto os briquetes aglomerados com cal e melaço podem desintegrar dentro do forno pelo alto índice de crepitação. As Figuras 31.A, 31.B e 32 apresentam as massas retidas nas peneiras durante o ensaio.

Figura 31 – Resultados da crepitação do briquete utilizando aglomerante bentonita.

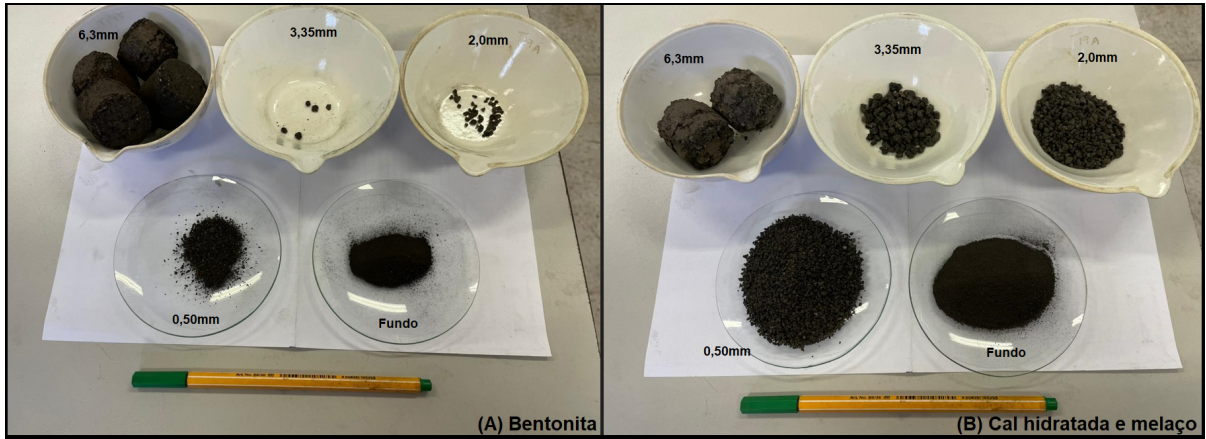
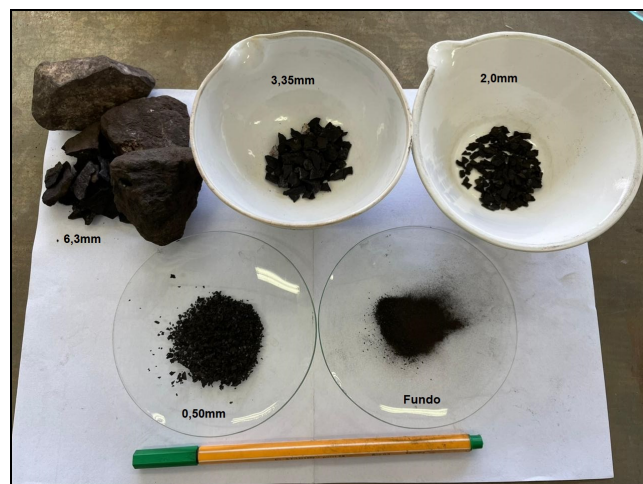


Figura 32 – Resultados da crepitação do granulado.



6 CONCLUSÕES

1. O fino de minério de manganês exibe uma ampla faixa granulométrica estabelecendo um cenário favorável para a fabricação de briquetes com alta qualidade. A composição da amostra revela que 90% das partículas apresentam dimensões inferiores 3,2mm e 12% das partículas abaixo de 0,2mm, possibilitando assim uma maior densificação e coesão de partículas do briquete. O pó do britador tem sua faixa granulométrica entre, $4\mu\text{m}$ a $125\mu\text{m}$ desempenhando na briquetagem a função de nucleante.
2. A caracterização mineralógica do fino de minério de manganês apresentou três principais minerais com teores significativos de manganês, sendo estes a todorokita, espessartita e pirolusita. O quartzo também foi encontrado, sendo este o mineral ganga do conjunto.
3. A caracterização química das matérias-primas, evidenciou a presença teores Mn, Fe, P, SiO_2 , Al_2O_3 , CaO, MgO. Dentre esses, o Mn e SiO_2 são cruciais para os parâmetros de produção de ferro ligas de manganês. O elemento de interesse, o manganês foi encontrado no fino de minério de manganês e pó do britador, com 26,29% e 34,77% respectivamente. A sílica, material destinado principalmente a escória no processo de produção de ferro ligas, apresentou como esperado o teor de 48,20% no aglomerante bentonita, enquanto a cal hidratada alcançou o valor de 6%.
4. Os gráfico de Pareto e de efeitos revelaram que a utilização de bentonita como aglomerante em maiores proporções (12%) resultaram em valores ampliados de resistência ao impacto e à abrasão por tamboramento. Além disso, a elevação das pressões de compactação de 25MPa para 80MPa conduziu a um aumento da densidade aparente média, tanto nos briquetes confeccionados com bentonita, como naqueles produzidos com cal hidratada e melaço. No aspecto de briquetes desenvolvidos com cal hidratada e melaço, foi identificada a importância de empregar períodos mais extensos de cura como de 18 dias, visto que essa variável exerceu grande influência sobre o ensaio de resistência ao impacto.
5. O tempo de armazenamento de 6 meses gerou resultados condicionais para o uso de bentonita comparado aos briquetes produzidos com cal hidratada e melaço, visto que houve surgimento de mofo neste briquetes e o seu desempenho poderá ser comprometido em qualidade. Assim, é necessário melhores análises com relação a forma de estocagem de briquetes, e comparação com o comportamento de granulados, visto que não apresentaram as mesmas características. A crepitação revelou o comportamento metalúrgico dos briquetes, obtendo resultados próximos entre o briquete elaborado com bentonita (3,96) e o granulado (5,74) que é utilizado comumente na produção de ferro ligas de manganês. Em contra partida, os briquetes que utilizaram cal hidratada e melaço não se adequaram e foram reprovados no ensaio de crepitação.

REFERÊNCIAS

- AFONSO, J. C. Manganês no brasil: descoberta, extração, consumo e comercialização numa perspectiva histórica. *Química Nova*, 2020. SciELO Brasil, v. 42, p. 1172–1183, 2020.
- BARBOSA, P. d. C. *Aproveitamento de finos de minério de manganês para aglomeração por briquetagem*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2021.
- BHATTACHARYA, S.; SETT, S.; SHRESTHA, R. M. State of the art for biomass densification. *Energy Sources*, 1989. Taylor & Francis, v. 11, n. 3, p. 161–182, 1989.
- BRASILEIROS, M. *Melaços Brasileiros/Aplicações*. 2022. Url<https://melacos.com.br/outras-aplicacoes>.
- BRISSE, A. H.; ROHAUS, D. E. *Method of briquetting iron oxide fines*. [S.l.]: Google Patents, 1965. US Patent 3,174,846.
- BY, T. *Briquetting of Manganese Oxide Fines with Organic Binders-How well suited are organic binders for agglomeration of Mn-oxide fines?* Dissertação (Mestrado) — NTNU, 2017.
- CARVALHO, E. A. d.; BRINCK, V.; CAMPOS, A. R. d. Aglomeração: Briquetagem. In: . [S.l.]: CETEM/MCTIC, 2018.
- CARVALHO, J. J. d. S. Influência da reatividade do coque siderúrgico sobre o processo de redução da pelota e do sinter destinados aos altos-fornos. 2014. 2014.
- CHELONI, L. D. M. S.; LOPES, L. da V.; REIS, E. Compressive strength behavior of briquettes produced from manganese ore fines and metal dust: Optimization using response surface methodology. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2023. Taylor & Francis, p. 1–14, 2023.
- CHIAVERINI, V. *Tecnologia mecânica*. [S.l.]: McGraw Hill, 1986.
- COSTA, A. B. *Caracterização de minérios do distrito manganífero de São João Del Rei (MG) com ênfase no rendimento da produção de ferro-ligas*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2020.
- DEHONT, F. *Coal briquetting technology*. [S.l.: s.n.], 2006. 10 p.
- DUTTA, S.; GHOSH, A. Study of nonisothermal reduction of iron ore-coal/char composite pellet. *Metallurgical and Materials transactions B*, 1994. Springer, v. 25, n. 1, p. 15–26, 1994.
- EISELE, T.; KAWATRA, S. A review of binders in iron ore pelletization. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2003. Taylor & Francis, v. 24, n. 1, p. 1–90, 2003.
- EREMIN, A. Y.; BABANIN, V.; KOZLOVA, S. Y. Establishing the requirements for indices characterizing the mechanical strength of briquets with binders. *Metallurgist*, 2003. Springer, v. 47, n. 11, p. 437–446, 2003.
- FARIA, G.; JANNOTTI, N.; ARAÚJO, F. da S. Decrepitation behavior of manganese lump ores. *International Journal of Mineral Processing*, 2012. Elsevier, v. 102, p. 150–155, 2012.

FARIA, G. L. d. Estudo da intensidade de crepitação de minérios granulados de manganês do Brasil. 2008. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. REDEMAT, 2008.

FEECO, T. I. Handbook agglomeration, feeco international: Green bay. WI, USA, 2018. 2018.

HALT, J.; KAWATRA, S. K. Review of organic binders for iron ore agglomeration. *online source: http://chem.mtu.edu/chem_eng/skka_watr/2013/2013_May_OrganicBinderReview.pdf, accessed on 24th November, 2017.* 2017.

IMNI, I. I. M. *INTERNATIONAL INSTITUTE MANGANESE 2023*. 2023.

Url<https://www.manganese.org/discovery-health-and-safety/>.

JESUS, L. G. M. d. Avaliação da pré-redução de briquetes de finos de minérios de manganês em ambientes análogos aos fornos elétricos a arco submerso. 2020. 2020.

KALIYAN, N.; MOREY, R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and bioenergy*, 2009. Elsevier, v. 33, n. 3, p. 337–359, 2009.

LEÃO, P. M. G. C. 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. 2021.

LEMOS, L. R. et al. Mechanical strength of briquettes for use in blast furnaces. *REM-International Engineering Journal*, 2019. SciELO Brasil, v. 72, p. 63–69, 2019.

LUZ, A. B. d.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. *Tratamento de minérios*. [S.l.]: CETEM/MCT, 2010.

MALAN, J.; BARTHEL, W.; DIPPENAAR, B. Optimizing manganese ore sinter plants: process parameters and design implications. In: CITESEER. *Proceedings: Tenth International Ferroalloys Congress*. [S.l.], 2004.

MANTOVANI, M.; TAKANO, C.; BÜCHLER, P. Electric arc furnace dust-coal composite pellet: effects of pellet size, dust composition, and additives on swelling and zinc removal. *Ironmaking & steelmaking*, 2002. Taylor & Francis, v. 29, n. 4, p. 257–265, 2002.

MATRICARDI, L. R.; DOWNING, J. Manganese and manganese alloys. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 2000. Wiley Online Library, 2000.

MOURÃO, J. M. Aspectos conceituais relativos à pelletização de minérios de ferro. *ABM Proceedings*, 2017. v. 1407, p. 243, 2017.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. *Como fazer experimentos-: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria*. [S.l.]: Bookman Editora, 2010.

OLBRICH, H. The molasses. *Biotechnologie-Kempe GmbH*, 2006. v. 128, 2006.

OLIVEIRA, M. L. de. *Bentonita*. 2022. Urlhttps://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/bentonita_m2018.

PAN, J. et al. Improving sintering performance of specularite concentrates by pre-briquetting process. *ISIJ International*, 2016. The Iron and Steel Institute of Japan, v. 56, n. 5, p. 777–785, 2016.

PIETSCH, W. B. *Agglomeration processes: phenomena, technologies, equipment*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2002.

REIS, É. L. Caracterização e tratamento de alguns minérios de manganês utilizados para a produção de ferro-ligas, com ênfase no comportamento do as, pb, cd, hg e zn. 2010. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. REDEMAT, 2010.

SAH, R.; DUTTA, S. Effects of binder on the properties of iron ore-coal composite pellets. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*, 2010. Taylor & Francis, v. 31, n. 2, p. 73–85, 2010.

SILVA, A.; FERREIRA, H. Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 2008. v. 3, n. 2, p. 26–35, 2008.

SILVA, D. et al. A influência da umidade em propriedades mecânicas de briquetes produzidos com resíduos de madeira (eucalyptus sp. e pinus sp.). *Revista Virtual Química*, 2017. v. 9, n. 3, p. 1078–1086, 2017.

SINGH, V. et al. Beneficiation and agglomeration process to utilize low-grade ferruginous manganese ore fines. *International Journal of Mineral Processing*, 2011. Elsevier, v. 99, n. 1-4, p. 84–86, 2011.

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

TEÓFILO, R. F.; FERREIRA, M. Quimiometria ii: planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial. *Química nova*, 2006. SciELO Brasil, v. 29, p. 338–350, 2006.

YOSHIKOSHI, H. et al. Development of composite cold pellet for silico-manganese production. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 1984. The Iron and Steel Institute of Japan, v. 24, n. 6, p. 492–497, 1984.