



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO



LUCAS DIMAS DE SOUZA

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE UM REJEITO DE
MINÉRIO DE MANGANÊS**

OURO PRETO

2024

LUCAS DIMAS DE SOUZA

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE UM REJEITO DE
MINÉRIO DE MANGANÊS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof. Dr^a Érica Linhares Reis

OURO PRETO

2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S729c Souza, Lucas Dimas de.
Caracterização tecnológica de um rejeito de minério de manganês.
[manuscrito] / Lucas Dimas de Souza. - 2024.
44 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Érica Linhares Reis.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Caracterização tecnológica de minérios. 2. Manganês. 3. Rejeitos (Mineração). 4. Determinação mineralógica. I. Reis, Érica Linhares. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.341

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucas Dimas de Souza

Caraterização tecnológicas de um rejeito de minério de manganês

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 21 de fevereiro de 2024

Membros da banca

Érica Linhares Reis - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Mestre - Letícia Maria de Melo Silva Cheloni - Instituto Federal de Minas Gerais/ Campus Ouro Branco
Mestre - Tiany Guedes Cota - Universidade Federal do Ceará/Campus Crateus

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 01/03/2024



Documento assinado eletronicamente por **Erica Linhares Reis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/03/2024, às 10:14, 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 **0676906** e o código CRC **B5BBBBF8**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por todas as bênçãos alcançadas e por mais essa etapa.

Aos meus pais, Eliane e Milton por sempre me apoiarem e incentivarem, com a confiança que este dia chegaria. Ao meu irmão Luanderson e minha namorada Mylenia por sempre me ajudarem nos momentos complicados e me acompanharem durante essa trajetória.

Aos meus familiares e amigos de curso, em especial ao Carlos Eduardo, Carolina Mendonça, Danilo Rocha, Marcelo Ferreira, Miriam Gomes, Pedro dos Santos, Thaís Vilela e Vitor Gomes, pelo companheirismo e confiança durante a jornada.

Aos professores da UFOP que contribuíram para minha formação e no meu crescimento profissional. Aos professores do Departamento de Engenharia de Minas, em especial a Prof.^a Dr.^a Érica Linhares Reis, pela orientação e por todo ensinamento repassado no decorrer desse trabalho e pela oportunidade de me acompanhar em minha Iniciação Científica que contribuiu pontualmente para a realização desse trabalho de conclusão, sendo assim, pessoa de suma importância na minha formação.

Às professoras integrantes da banca examinadora, Leticia Maria de Melo Silva Cheloni e Tiany Guedes Cota, pelo interesse e disponibilidade.

À Universidade Federal de Ouro Preto e todos os seus profissionais, por terem proporcionado um ensino gratuito e de qualidade.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que de alguma forma participaram e me auxiliaram nessa etapa muito importante da minha vida.

RESUMO

Neste trabalho são apresentados estudos de caracterização de um rejeito de minério de manganês de uma mineradora localizada no distrito manganífero de São João Del Rei – MG. Na caracterização estão apresentadas análises granulométricas por peneiramento a úmido, mineralógicas por difração de Raios X e químicas, além de, análises de propriedades físicas como umidade e densidade. Após a caracterização tecnológica, foram realizados ensaios de concentração densitária e magnética, tendo como variáveis as frações granulométricas (amostra global e fração maior que 38 μ m) e variação da intensidade da corrente aplicada (ensaio de separação magnética).

Na análise granulométrica da amostra global observou-se que 80% das partículas encontram-se abaixo de 0,185 mm. Conforme análise química da amostra global, os teores dos principais elementos analisados, Mn, Fe e SiO₂, são iguais a 17,55%; 7,85% e 37,00%, respectivamente. Na caracterização mineralógica, identificaram-se os minerais de manganês espessartita, todorokita e pirolusita e o mineral de ganga quartzo. A partir das análises das propriedades físicas, pode-se observar umidade igual a 5,21% e densidade da amostra global igual a 2,89 g/cm³. Nos ensaios de concentração com a mesa oscilatória, o resultado mais satisfatório foi alcançado utilizando a amostra global, com uma recuperação metalúrgica de 45,79%. Neste ensaio, o teor de Mn foi de 28,04% enquanto o teor de SiO₂ foi de 31,06%. Em relação à concentração magnética, observou-se que para ambas frações granulométricas, obteve-se uma recuperação metalúrgica de Mn em torno de 30% utilizando uma maior intensidade de campo (2A) com maior teor de Mn igual a 26,90% e SiO₂ igual a 30%.

Palavras-chave: Manganês, Caracterização, Rejeito, Concentração.

ABSTRACT

This work presents characterization studies of a manganese ore tailings from a mining company located in the manganese district of São João Del Rei – MG. The characterization includes granulometric analyzes by wet sieving, mineralogical analyzes by X-ray diffraction and chemical analyses, in addition to analyzes of physical properties such as humidity and density. After technological characterization, density and magnetic concentration tests were carried out, with variables such as particle size fractions (global sample and fraction greater than 38 μ m) and variation in the intensity of the applied current (magnetic separation test).

In the particle size analysis of the global sample, it was observed that 80% of the particles are below 0.185 mm. According to the chemical analysis of the global sample, the levels of the main elements analyzed, Mn, Fe and SiO₂, are equal to 17.55%; 7.85% and 37.00%, respectively. In the mineralogical characterization, the manganese minerals spessartite, todorokite and pyrolusite and the gangue mineral quartz were identified. From the analysis of the physical properties, humidity equal to 5.21% and density of the global sample equal to 2.89 g/cm³ can be observed. In concentration tests with the oscillating table, the most satisfactory result was achieved using the global sample, with a metallurgical recovery of 45.79%. In this test, the Mn content was 28.04% while the SiO₂ content was 31.06%. Regarding the magnetic concentration, it was observed that for both particle size fractions, a metallurgical recovery of Mn of around 30% was obtained using a higher field intensity (2A) with a higher Mn content equal to 26.90% and SiO₂ equal to 30%.

Keywords: Manganese, Characterization, Tailings, Concentration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Fluxograma do processo de beneficiamento do minério de manganês	16
Figura 4.1 - Fluxograma dos métodos de homogeneização e quarteramento da amostra	20
Figura 4.2 - Fluxograma dos métodos de caracterização da amostra.	21
Figura 4.3 - Fluxograma dos métodos de concentração da amostra.....	21
Figura 4.4 - Tronco de cone utilizado pelo método da pilha cônica.	22
Figura 4.5 - Fracionamento do tronco de cone.	23
Figura 4.6 - Pilha longitudinal obtida pelo método da pilha alongada.....	23
Figura 4.7 - Quarterador Jones.....	24
Figura 4.8 - Quarterador 8 canais.	24
Figura 4.9 - Peneiramento a úmido feito para a análise granulométrica da amostra.....	26
Figura 4.10 - Mesa oscilatória utilizada para concentração gravítica	28
Figura 4.11 - Separador magnético utilizado para concentração magnética.	28
Figura 5.1 - Distribuição granulométrica da amostra global.	31
Figura 5.1 - Difratoograma da amostra global dos finos do minério de manganês.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Reserva mundial de manganês em 2017.	14
Tabela 3.2 - Reserva nacional de manganês em 2017.....	14
Tabela 3.3 - Produção nacional bruta de manganês em 2021.	14
Tabela 3.4 - Classificação e especificação dos produtos gerados	17
Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados para o método do picnômetro.	25
Tabela 5.1 - Comparativo dos valores de massa da amostra no teste de umidade.	29
Tabela 5.2 - Resultados dos ensaios de picnometria para os diferentes intervalos.	30
Tabela 5.3 - Valores de ρ médio para os respectivos intervalos analisados.	30
Tabela 5.4 - Distribuição granulométrica após o peneiramento a úmido.	31
Tabela 5.5 - Resultados da análise química para os três intervalos analisados.	32
Tabela 5.6 - Minerais encontrados na caracterização mineralógica e algumas características.	33
Tabela 5.7 - Balanço de massa e metalúrgico do ensaio de concentração global	34
Tabela 5.8 - Balanço de massa e metalúrgico do ensaio de concentração $> 38\mu\text{m}$	34
Tabela 5.9 - Relação teor inicial x teor final e recuperação metalúrgica para os diferentes intervalos.	34
Tabela 5.10 - Comparativo do ensaio de concentração gravítica x especificações dos produtos utilizados.	35
Tabela 5.11 - Balanço de massa e metalúrgico do ensaio de separação magnética – Global ($< 2 \text{ mm}$) - 1A.	37
Tabela 5.12 - Balanço de massa e metalúrgico do ensaio de separação magnética – Global ($< 2 \text{ mm}$) - 2A.	37
Tabela 5.13 - Balanço de massa e metalúrgico do ensaio de separação magnética - $> 38\mu\text{m}$ – 1A	37
Tabela 5.14 - Balanço de massa e metalúrgico do ensaio de separação magnética - $> 38\mu\text{m}$ – 2A	38
Tabela 1.15 - Relação teor inicial x teor final e recuperação metalúrgica para amostra global e variações das intensidades de corrente aplicada.	38
Tabela 1.16 - Relação teor inicial x teor final e recuperação metalúrgica para amostra $> 38\mu\text{m}$ e variações das intensidades de corrente aplicada.	38
Tabela 5.17 - Comparativo do ensaio de separação magnética x especificações dos produtos utilizados.	39

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	11
2.	OBJETIVOS.....	12
2.1.	Objetivo geral	12
2.2.	Objetivos específicos	12
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1.	Minérios de manganês - aspectos gerais	13
3.2.	Reservas mundiais e brasileiras	14
3.3.	Caracterização de minérios.....	15
3.4.	Beneficiamento do minério de manganês.....	15
3.5.	Métodos gravíticos e magnéticos na concentração de minérios de manganês ...	18
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	20
4.1.	Preparação da amostra	22
4.1.1.	Homogeneização da amostra	22
4.1.2.	Quarteamento	24
4.2.	Caracterização da amostra	24
4.2.1.	Ensaio de umidade e densidade	24
4.2.2.	Análise granulométrica da amostra	26
4.2.3.	Análise química da amostra.....	26
4.2.4.	Caracterização mineralógica	26
4.3.	Ensaio de concentração	27
4.3.1.	Concentração gravítica	27
4.3.2.	Separação magnética	28
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
5.1.	Ensaio de umidade e densidade	29
5.2.	Análise granulométrica.....	31
5.3.	Análise química da amostra.....	32
5.4.	Caracterização mineralógica.....	32
5.5.	Concentração gravítica	33
5.6.	Separação magnética	36
6.	CONCLUSÕES.....	40
	REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

O manganês (Mn) é 12º elemento mais abundante na Terra, ocorrendo na natureza combinado com outros elementos, formando minerais, na sua maioria óxidos, podendo também ocorrer na forma de hidróxidos, silicatos e carbonatos. O principal setor consumidor é o siderúrgico, o qual, em nível mundial, representa 85% da demanda por manganês. (DIAS & CAXITO, 2018; SAMPAIO et al., 2008).

Segundo DIAS & CAXITO (2018), o minério de manganês é considerado essencial na fabricação de ferro-ligas, importante na produção de aço, podendo também, ser utilizado em ligas de cobre, zinco, alumínio, estanho e chumbo. Por ser fundamental na fabricação de ferro-ligas de manganês, é necessário que especificações granulométricas e químicas desse minério sejam atendidas.

De acordo JESUS (2020), o processo de beneficiamento de minérios de manganês, em geral, consiste em uma sequência de operações de moagem, peneiramento e classificação. Os rejeitos são constituídos basicamente de partículas finas que não atendem as exigências granulométricas para que sejam utilizados diretamente na fabricação de ferro-ligas e são depositados em bacias de sedimentação ou diretamente em barragens de rejeito.

Porém, como visto em SOUZA et al. (2015), com a exaustão do minério de alto teor no depósito e restando grandes quantidades de minérios de baixo teor, mostra-se de grande importância o estudo do desenvolvimento de rotas de beneficiamento de minérios de baixo teor, que atualmente não são utilizados como produtos por não possuírem teor adequado e apresentarem alta presença de contaminantes.

Uma das alternativas para uma eventual utilização de minérios com baixo teor, é o estudo de métodos de concentração, na qual, em uma primeira etapa, realiza-se ajustes em termos de teor de Mn, para que, havendo viabilidade em termos de teores, consiga em uma etapa posterior com ajuste granulométrico, atender as especificações comerciais necessárias.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Caracterizar um rejeito de minério de manganês de uma mineradora localizada no distrito manganífero de São João Del Rei (Minas Gerais) e verificar os efeitos da utilização de processos de concentração sobre esses rejeitos.

2.2. Objetivos específicos

- a) Realizar a caracterização física, química e mineralógica do rejeito.
- b) Realizar ensaios de concentração utilizando equipamentos de separação densitária e separação magnética.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Minérios de manganês - aspectos gerais

O manganês possui uma mineralogia diversificada e complexa, não se apresentando de forma elementar na natureza, sendo assim, o manganês ocorre através de óxidos, hidróxidos, silicatos, carbonatos e sulfetos, caracterizando cerca de 300 formas de minerais de manganês, sendo que, em relação à fins comerciais, as formas mais usuais desses minerais são: pirolusita (MnO_2), hausmannita (Mn_3O_4) e manganita ($Mn_2O_3 \cdot H_2O$). (DIAS & CAXITO, 2018).

Segundo BENIQUE (2007), no começo do século XIX, foram feitas inúmeras descobertas com o uso do manganês para fins de produção de aço, dentre elas:

- Em 1816, o manganês foi utilizado como componente para aumentar a dureza do ferro sem afetar as suas condições de maleabilidade e tenacidade;
- De 1826 a 1840, surgiram os primeiros indícios de produção de ligas com ferro-manganês (80% de Mn) e a produção de metálica de manganês na Inglaterra;
- Em 1841, Pourcel começou a fabricar um ferro gusa com alto teor de manganês denominado “spiegel” em nível industrial e em 1875, ele iniciou a produção comercial de ferro-manganês com 65% de Mn;
- Em 1860, Henry Bessemer refinou o método de fabricação de aço com adição de manganês na liga de ferro visando remover o excesso de oxigênio e enxofre residuais presente no aço;
- Em 1866, William Siemens patenteou o uso de ferro-manganês na fabricação de aço, mas como controlador dos níveis de enxofre.

O manganês é um elemento que possui qualidades importantes para a indústria siderúrgica, devido à sua composição físico-químicas, podendo também ser utilizado como agente dessulfurante e desoxidante. Em paralelo à indústria siderúrgica, foi desenvolvido o uso de dióxido de manganês para as células de baterias, sendo atualmente, o mercado de baterias o segundo maior consumidor com fins industriais. Outros segmentos importantes na utilização de manganês são: produção de fertilizantes, rações de animais, pinturas, agentes químicos, indústria automobilística e mercado de vitaminas (POSTLE et al., 2015; ANM, 2018).

3.2. Reservas mundiais e brasileiras

Segundo ANM (2018), as reservas mundiais de manganês (Tabela 3.1), foram estimadas em 842,5 Mt de minério, enquanto as reservas nacionais de manganês (Tabela 3.2), foram estimadas em aproximadamente em 272,5 Mt de minério.

Tabela 3.1 - Reserva mundial de manganês em 2017.

Países	Reservas (10³ t)	Total de reservas (%)
Brasil	272.567	32,3%
África do Sul	200.000	23,7%
Ucrânia	140.000	16,6%
Austrália	91.000	10,8%
Índia	52.000	6,2%
China	43.000	5,1%
Gabão	22.000	2,6%
Gana	12.000	1,4%
Outros países	10.000	1,3%
Total	842.567	100,0%

FONTE: ANM (2018).

Tabela 3.2 - Reserva nacional de manganês em 2017.

Estados	Reservas (10³ t)	Total de reservas (%)
Minas Gerais	181.200	66,5%
Pará	69.300	25,4%
Amapá	9.700	3,6%
Mato Grosso do Sul	7.500	2,8%
Outros estados	4.867	1,7%
Total	272.567	100,0%

FONTE: ANM (2018).

Conforme ANM (2018), as principais mineradoras produtoras são: VALE S/A (MG e PA), Mineração Buritirama S/A (PA), e Mineração Corumbaense Reunida S/A (MS). Segundo ANM (2022), o Brasil apresentou produção bruta de 1,77 Mt (Tabela 3.3), com teor médio de 29,55% de Mn, sendo os principais estados produtores:

Tabela 3.3 – Produção nacional bruta de manganês em 2021.

Estados	Produção (10³ t)	Teor Mn (%)
Pará	720,18	35,15%
Minas Gerais	346,47	16,57%
Ceará	288,76	15,66%
Mato Grosso do Sul	271,01	45,15%
Tocantins	86,00	22,49%
Goiás	62,79	43,27%
Total	1.775,21	---
Teor Médio	---	29,55%

FONTE: ANM (2022).

3.3. Caracterização de minérios

Segundo LUZ et al. (2010), a caracterização de minérios é uma etapa fundamental para o aproveitamento de um recurso mineral de forma otimizada, uma vez que, oferece os subsídios mineralógicos e texturais necessários para um correto dimensionamento da rota de processo da empresa, permitindo identificar com precisão, inferências e perdas em processos existentes, possibilitando a otimização do rendimento global de uma planta.

Ainda conforme LUZ et al. (2010), as informações obtidas na caracterização, depois de analisadas e compatibilizadas, podem ser utilizadas para:

- indicar etapas para o desenvolvimento de fluxograma de beneficiamento e sugerir determinados tipos de ensaios de concentrações, com base nas características mais importantes dos minerais do minério;
- permitir a compreensão do comportamento dos minerais do minério em face de um determinado processo de beneficiamento e/ou metalúrgico;
- determinar a qualidade dos produtos obtidos em diferentes tipos de ensaios, por intermédio das identificações mineralógicas dos concentrados e rejeitos avaliando seu respectivo grau de seletividade;
- complementar os estudos da jazida, a partir do conhecimento das diferentes tipologias do minério, segundo identificações de diferentes amostras relativas ao avanço da frente de lavra.

3.4. Beneficiamento do minério de manganês

A mineração fornecedora do rejeito em estudo está associada a uma empresa metalúrgica produtora de ferro-ligas e se localiza no distrito manganésífero de São Joao Del Rei (MG). A mineradora atende a necessidade de minério de manganês para fábricas localizadas nas cidades de São João Del Rei e Conselheiro Lafaiete, para a produção de ligas de FeSiMn (ferro sílico-manganês) e FeMnAC (ferro manganês de alto carbono).

Segundo COSTA (2020), a mina tem capacidade estimada de 30.000 ton/ano e o minério explotado é constituído principalmente pelos minerais de manganês espessartita e todorokita e pelos minerais de ganga quartzo e dolomita, possuindo teores de Mn, Fe, SiO₂ e Al₂O₃ em torno de 30,8%, 5,2%, 25,4% e 12,1%, respectivamente. Por meio desses

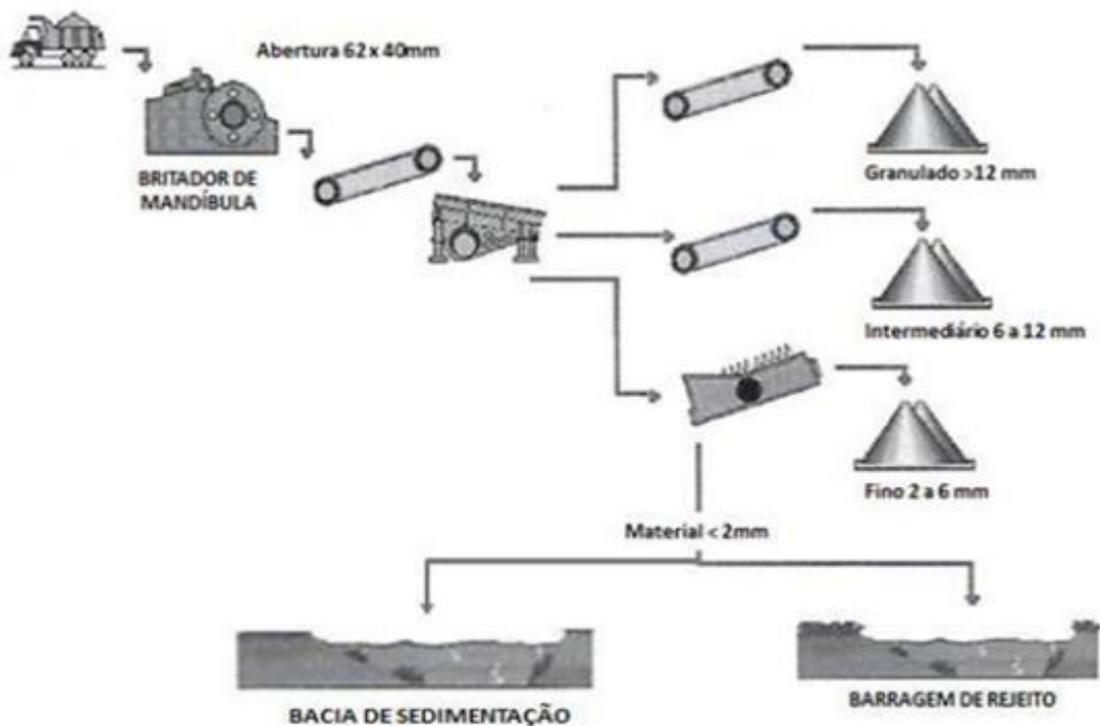
teores, é possível afirmar que o minério explotado apresenta uma relação Mn/Fe igual a 5,9.

Pelo minério apresentar uma relação Mn/Fe igual a 5,9, ele pode ser classificado como um minério de manganês, uma vez que, segundo a classificação para os depósitos de manganês proposta por GONÇALVES & SERFATY (1976), é denominado:

- Minério de manganês: quando a relação Mn/Fe for igual ou maior a 4;
- Minério de ferro-manganês – quando a relação Mn/Fe for menor que 4.

De acordo com BARBOSA (2021), as plantas de beneficiamento da mineradora (Figura 3.1) são constituídas de britagem e rebitagem do minério por meio de um britador de mandíbulas e a classificação granulométrica é realizada por peneiras vibratórias e classificador helicoidal.

Figura 3.1 - Fluxograma do processo de beneficiamento do minério de manganês.



FONTE: BARBOSA (2021).

Ainda conforme BARBOSA (2021), como a produção da empresa é direcionada para o consumo interno do grupo, na fabricação de ferro-ligas, a especificação dos seus produtos

é voltada para atender as necessidades dos seus fornos elétricos. Na Tabela 3.4 está apresentado a classificação e especificação dos produtos gerados:

Tabela 3.4 – Classificação e especificação dos produtos gerados.

Produtos	Faixa granulométrica	Especificação química			
		%Mn	%Fe	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃
Granulado	75,0 a 12,0 mm	29 a 30	5 a 6 (máx)	24 a	11 (máx)
Intermediário	12,0 a 6,0 mm			26	
Fino	6,0 a 2,0 mm			26 (máx)	

FONTE: BARBOSA (2021).

O material com granulometria abaixo de 2,0 mm, que é objeto de estudo desse trabalho, é considerado como rejeito e é descartado em bacias de sedimentação ou diretamente na barragem de rejeitos.

De acordo com JESUS (2020), em geral, o processo de beneficiamento de minérios de manganês consiste basicamente em processos de fragmentação e classificação, com pouca utilização de métodos de concentração. Isso ocorre pelo fato de o minério de manganês atualmente apresentar alto teor e pelos rejeitos serem constituídos de partículas finas que não atendem as exigências granulométricas para que sejam utilizados diretamente na produção de ferro-ligas.

Segundo COSTA (2020), não existe uma rota de tratamento padrão para o beneficiamento do minério de manganês dessa unidade, pois o minério apresenta uma alta diversidade e complexidade mineralógica nos depósitos. Com o minério de manganês com alto teor, era comum a simples lavagem, classificação granulométrica e às vezes a separação por meio gravítico.

Ainda de acordo com COSTA (2020), com a indisponibilidade de oferta de reservas oxidadas e de elevada qualidade, passaram a ser empregados circuitos mais complexos de concentração, por meio da utilização de métodos de concentração gravítica, flotação e separação magnética, principalmente para a recuperação de partículas abaixo de 1,0 mm, porém, esses métodos clássicos de concentração apresentam baixo desempenho para as frações granulométricas inferiores a 0,106 mm.

SOUZA et al. (2015), indica que com a exaustão do minério de alto teor no depósito e restando grandes quantidades de minérios de baixo teor, mostra-se de grande importância

o estudo do desenvolvimento de rotas de beneficiamento de minérios de baixo teor, que atualmente não são utilizados como produtos por não possuírem teor adequado e apresentarem alta presença de contaminantes.

3.5. Métodos gravíticos e magnéticos na concentração de minérios de manganês

Uma das alternativas para uma eventual utilização de minérios com baixo teor e que atualmente são descartados como rejeitos, é o estudo de métodos de concentração, na qual, em uma primeira etapa, realiza-se ajustes em termos de teor de Mn, para que, havendo viabilidade em termos de teores, consiga em uma etapa posterior com ajuste granulométrico, atender as especificações comerciais necessárias.

De acordo com LIMA et al. (2008), com a exaustão de minérios de manganês de alto teores, as indústrias terão que beneficiar minérios mais complexos e reprocessar os rejeitos que apresentam elevado teor e foram descartados no passado por não atender às especificações em termos granulométricos. Pelo fato de os métodos clássicos de concentração apresentarem-se baixo desempenho em frações granulométricas menores que 0,106 mm, fazem-se também necessários, estudos de concentração utilizando flotação, uma vez que, esse método permite o aproveitamento de minérios mais complexos e de granulometria mais finas que os métodos físicos de concentração.

Dado que o minério de manganês exibe uma diversidade e complexidade mineralógica consideráveis, e que com a exaustão das reservas com alto de alto de Mn, é essencial empregar métodos de concentração mineral para obter um teor comercialmente viável. Alguns exemplos desses métodos incluem os gravíticos, magnéticos e por flotação.

Visando aumentar a relação Mn/Fe de um minério de manganês da Mina de Urucum, SILVA e FELLOWS (1984) incrementaram um processo de pré-redução e separação magnética do minério. O processo de pré-redução foi feito utilizando temperaturas de 600°, 700° e 800°, enquanto o processo de separação magnética foi realizado pelo separador de disco STEARNS MAGNETIC, tipo C, utilizando um intervalo de intensidade de corrente aplicadas igual a 0,7 a 2,7A. Os resultados mostraram uma elevação da relação Mn/Fe, obtendo concentrados com relação Mn/Fe > 7,0, mostrando assim, que esse processo implementado, se mostra como uma alternativa para a utilização o minério de Urucum na fabricação de ligas ferro-manganês.

O uso da mesa oscilatória para concentração de minério de manganês, foi adotado por CANESCHI (1994), que estudou o minério de manganês da Mina de Peruaçu, MG. Adotou-se duas frações granulométricas diferentes, a primeira, com granulometria entre $-0,81+0,21$ mm, que apresentava um teor de 35% de Mn na alimentação e a segunda com granulometria entre $-0,21+0,074$ mm, com um teor de 32% de alimentação. Por meio dos ensaios de concentração, concluiu-se que, para ambas amostras houve aumento do teor de manganês do concentrado, sendo que, na primeira amostra obteve-se 40% de Mn e a segunda amostra apresentou um teor de 42% de Mn.

LIMA E REIS (2005), também por meio da mesa oscilatória, realizaram a concentração de finos de minérios de manganês provenientes da Unidade Morro da Mina (VALE), que está localizada próxima à cidade de Conselheiro Lafaiete - MG. O rejeito estudado estava majoritariamente abaixo de 0,149 mm e foram conduzidos estudos de concentração para três intervalos granulométricos: amostra global (com teor de 28,30% de Mn), amostra $> 0,074$ mm (com teor de 26,84% de Mn) e amostra $< 0,074$ mm (com teor de 31,31% de Mn). Os melhores resultados foram obtidos utilizando a mesa com 3° de inclinação e uma alimentação com 15% de sólidos na polpa, atingindo um teor médio de 31,5% de Mn e recuperações metalúrgicas acima de 77%, 81% e 62% de Mn nas amostras, respectivamente.

Utilizando da mesma amostra de rejeito da Unidade Morro da Mina e por meio de ensaios em espiral de Humphrey, REIS (2005) observou que para a fração $> 0,074$ mm, quanto maior a porcentagem de sólidos testadas na polpa de alimentação, maior era a recuperação de manganês no concentrado. Foram realizados ensaios com alimentação entre 15 a 30% de sólidos na polpa, onde observou-se que para a porcentagem de sólidos igual a 30%, a recuperação de Mn aumentou de aproximadamente 70% para 79% e o concentrado apresentou um teor médio entre 30 a 32% de Mn.

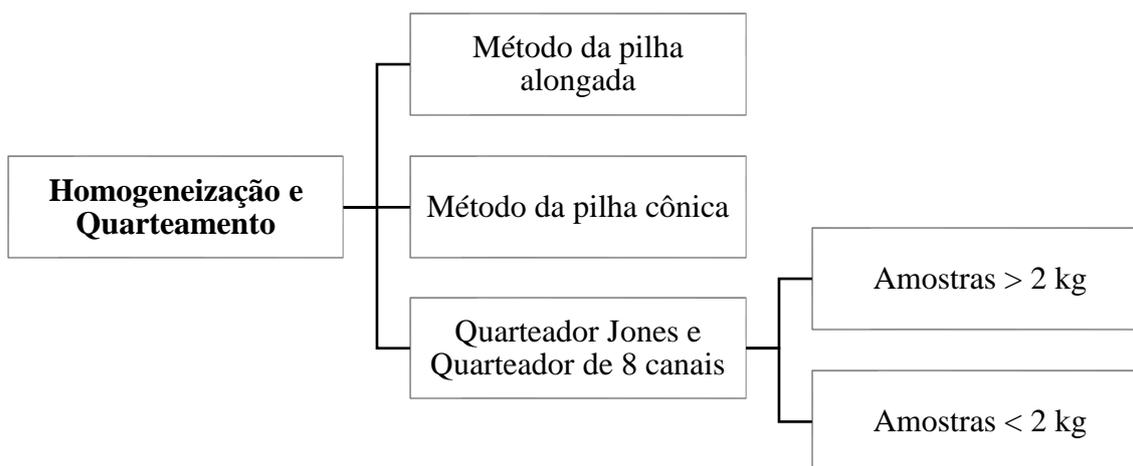
LIMA et al. (2008), utilizou flotação aniônica em pH alcalino do rejeito da planta da unidade Morro da Mina/RDM de Conselheiro Lafaiete – MG, utilizando sabões de ácidos graxos como coletores e o silicato de sódio como depressor. Foram realizados ensaios com porcentagem de sólidos da polpa no condicionamento e na flotação igual a 40%, onde observou-se uma recuperação metalúrgica de Mn de aproximadamente 63%, porém com um baixo enriquecimento do Mn, com teor variando de 29% para 32% de Mn. Observou-se também redução do teor de SiO₂, de 28% para 17%.

SILVA (2021), realizou a caracterização de minério de manganês por meio de flotação, o material foi submetido à caracterização inicial e por meio da análise química observou-se teor de Mn de 27%. Para o processo de flotação, utilizaram-se amostras com 27% de sólidos na polpa e foram utilizados dois coletores diferentes (Flotigam 7100 e Flotinor 1682) e amido de milho como depressor. Observou-se que utilizando o coletor Flotigam 7100, obteve-se uma espuma mais consistente e mineralizada, além de que, alcançou-se uma maior recuperação mássica, em torno de 40%.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste trabalho pode ser dividida em três etapas: preparação da amostra, caracterização e concentração. No processo de preparação, a amostra global enviada pela empresa, foi homogeneizada e quarteada, a fim de se obter alíquotas representativas para os demais processos. Em seguida, a amostra foi submetida às caracterizações química, granulométrica e mineralógica, além de ensaios de densidade e umidade. Por fim, realizaram-se ensaios de concentração gravítica e magnética, por meio da mesa oscilatória e do separador magnético de alta intensidade.

Figura 4.1 - Fluxograma dos métodos de homogeneização e quarteamento da amostra.



Os fluxogramas descritos nas Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3 possibilitam analisar detalhadamente a metodologia do trabalho.

Figura 4.2 - Fluxograma dos métodos de caracterização da amostra.

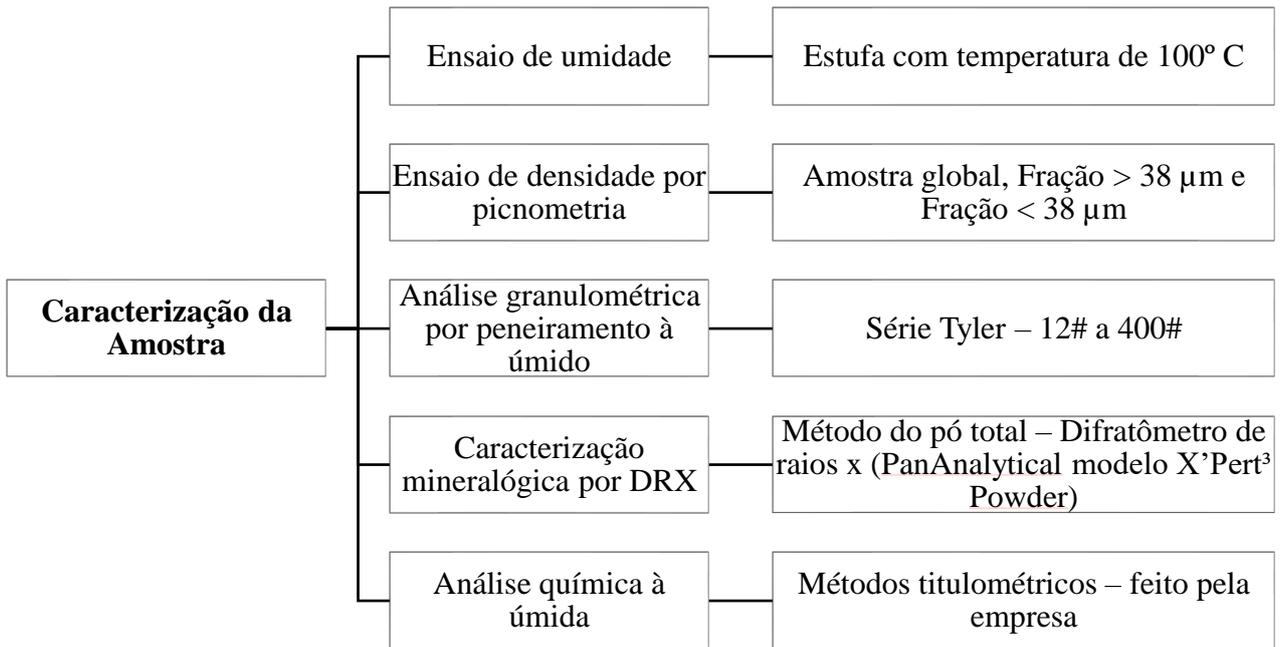
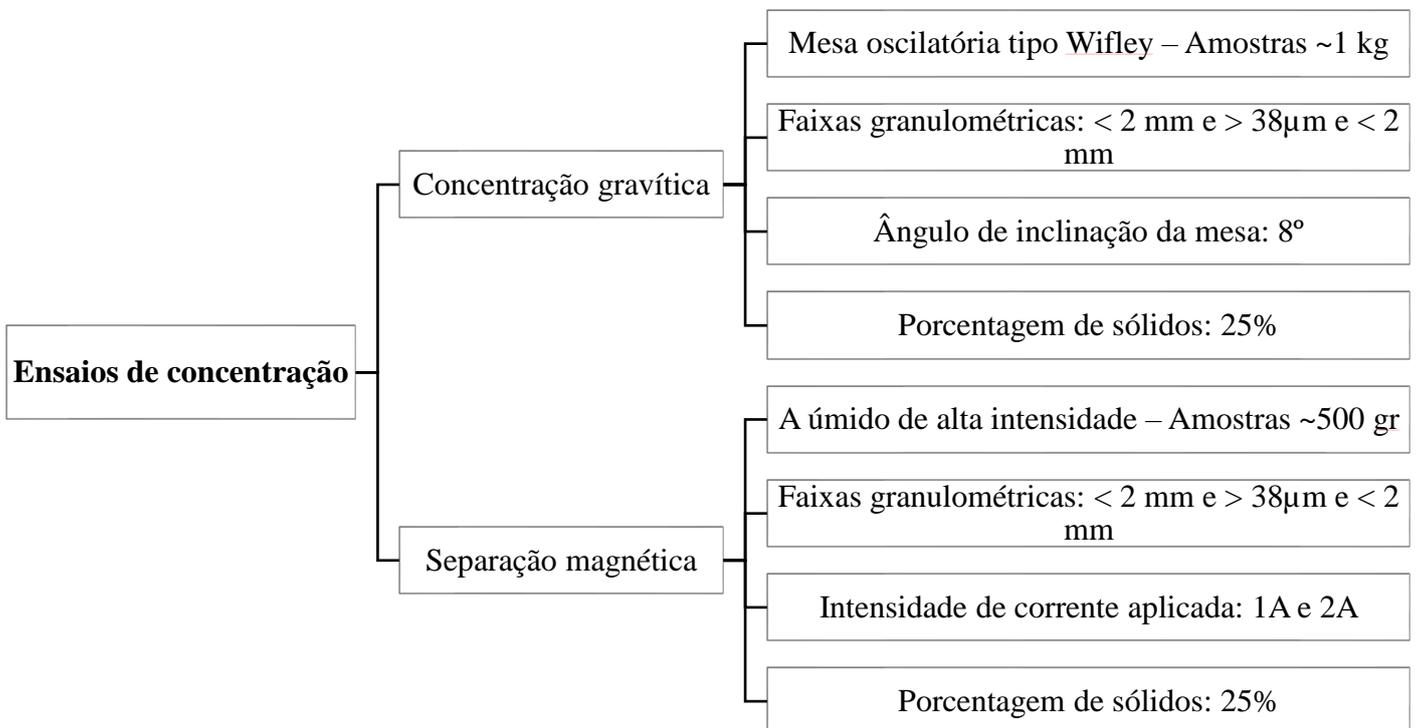


Figura 4.3 - Fluxograma dos métodos de concentração da amostra.



4.1. Preparação da amostra

A preparação da amostra de aproximadamente 32 Kg foi realizada por meio da homogeneização e posterior quarteamento, com objetivo de obter as alíquotas representativas necessárias para a realização dos posteriores ensaios de caracterização e concentração. Todos os equipamentos utilizados nesta etapa pertencem ao Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (DEMIN/UFOP), local esse, onde também foram realizadas as operações apresentadas a seguir.

4.1.1. Homogeneização da amostra

Para o processo de homogeneização da amostra, conciliaram-se dois métodos diferentes de amostragem, o método da pilha cônica e o método da pilha alongada.

4.1.1.1. Método da pilha cônica

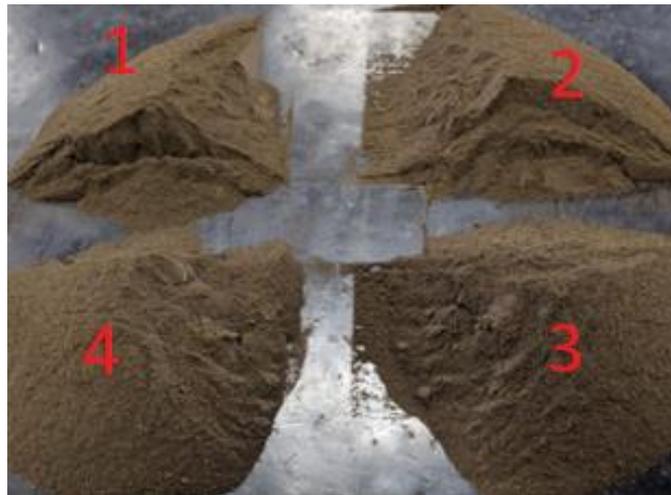
Para a realização desse método, foi necessário o uso de uma lona quadrada, na qual, o material foi depositado formando um cone e a homogeneização foi feita pela movimentação das pontas da lona, fazendo com que o material do fundo passe para cima. Essa movimentação foi feita em diagonal e por repetidas vezes, até notar-se que o material estava homogêneo. Após isso, achatou-se o seu vértice, para facilitar a divisão e deixar o material em formato de um tronco de cone, como mostrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Tronco de cone utilizado pelo método da pilha cônica.



Em sequência, o material foi separado em quatro partes como apresentado na Figura 4.5. As porções diagonalmente opostas (1-3 e 2-4) foram agrupadas, fracionando assim, a amostra total em duas menores.

Figura 4.5 - Fracionamento do tronco de cone.



4.1.1.2. Método da pilha alongada

Para otimizar a homogeneização, posteriormente ao primeiro método, a amostra foi novamente agrupada e com ela, foi confeccionada a pilha alongada, na qual, o material foi distribuído em movimentos de “vai e vem” em uma pilha longitudinal como observado na Figura 4.6, visando ao máximo, uma deposição constante durante todo o caminho percorrido. Em seguida, retoma-se o material constituinte das extremidades e o redistribui novamente ao longo da pilha, visando evitar erro de segregação. Com a finalidade de dividir a pilha em duas partes iguais, ela foi desmembrada em várias pequenas partes equivalentes que foram enumeradas, e para a divisão do todo, agrupou-se números pares em uma nova pilha, e os números ímpares em outra.

Figura 4.6 - Pilha longitudinal obtida pelo método da pilha alongada



4.1.2. Quarteamento

Após a homogeneização, efetuou-se o quarteamento da amostra, ou seja, subdividiu-se a mesma, com o objetivo de obter alíquotas representativas para os ensaios de caracterização e concentração. Para este procedimento, foram utilizados dois equipamentos: Quarteador tipo Jones (para amostras maiores que 2 Kg) apresentado na Figura 4.7 e o Quarteador de 8 canais (para amostras menores que 2 Kg) mostrado na Figura 4.8.

Figura 4.7 - Quarteador Jones.



Figura 4.8 - Quarteador 8 canais.



4.2. Caracterização da amostra

Visando obter informações importantes que são determinantes para a definição dos processos de concentração que seriam realizados posteriormente, foram realizadas diferentes técnicas de caracterização para a amostra: ensaios de umidade e densidade, caracterização granulométrica e mineralógica e análise química.

4.2.1. Ensaios de umidade e densidade

Para a realização do ensaio de umidade, coletou-se uma porção de amostra que foi pesada e levada à estufa a temperatura de 100°C, por onde permaneceu até encontrar-se totalmente seca. Em seguida, ela foi novamente pesada e pela obtenção desses valores, pôde-se pela Equação (1) calcular o seu respectivo teor de umidade (w).

$$umidade (w) = \frac{(M_p - M_s)}{M_s} * 100 \quad (1)$$

Onde: M_p : Massa do material úmido;

M_s : Massa do material seco;

w : Teor de umidade.

Posteriormente, foi realizado o ensaio de densidade da amostra por meio do método da picnometria. Os ensaios foram realizados em duplicata e analisando três diferentes intervalos de amostras: 1 – Amostra global, 2 – Fração < 38 μm ; 3 – Fração > 38 μm .

De acordo com SAMPAIO et al. (2007), o procedimento para a realização do ensaio de densidade por meio da picnometria está descrito a seguir:

1. Pesar o picnômetro vazio, previamente limpo e seco;
2. Encher o picnômetro com a amostra e, logo após, pesar todo o conjunto;
3. Adicionar água ao picnômetro com a amostra, até ocupar todo o volume do mesmo, e pesar novamente;
4. Retirar completamente o conteúdo do picnômetro, limpá-lo, e em sequência, adicionar água no mesmo até que transborde. Secar a água remanescente na superfície e, por fim, pesar o picnômetro com água.

A Tabela 4.1, apresenta as variáveis que serão encontradas durante o ensaio, para o cálculo da densidade (ρ):

Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados para o método do picnômetro.

Método do Picnômetro	
P_1	Picnômetro vazio
P_2	Picnômetro + amostra
P_3	Picnômetro + amostra + água
P_4	Picnômetro + água

Na qual, a densidade (ρ) é calculada pela Equação (2) abaixo:

$$\rho = \frac{(P_2 - P_1)}{(P_4 - P_3 + P_2 - P_1)} \quad (2)$$

4.2.2. Análise granulométrica da amostra

A análise granulométrica foi realizada por meio do peneiramento a úmido, como apresentado na Figura 4.9.

Figura 4.9 - Peneiramento a úmido feito para a análise granulométrica da amostra.



Para o ensaio, foram selecionadas as seguintes peneiras da série Tyler: 12#; 20#; 28#; 32#; 48#; 60#; 70#; 100#; 150#; 200#; 270#; 325# e 400#, aberturas essas, que foram escolhidas visando uma distribuição homogênea da amostra e respeitando a disponibilidade de peneiras no laboratório.

4.2.3. Análise química da amostra

Analogamente ao ensaio de densidade, a análise química foi realizada para três diferentes faixas granulométricas da amostra, visando determinar a distribuição do manganês e dos outros elementos presentes nas diferentes frações da mesma. Os ensaios para determinação da composição química foram realizados por via úmida, a partir de métodos titulométricos, pela empresa que forneceu o material analisado.

4.2.4. Caracterização mineralógica

Para a caracterização mineralógica qualitativa, segundo BARBOSA (2021), empregou-se a técnica de difração de raios X, pelo método do pó total, na qual pôde-se determinar os principais minerais constituintes da amostra global. Uma fração representativa da

amostra foi pulverizada e submetida à análise no difratômetro de raios X (*PanAnalytical*, modelo *X'Pert³ Powder*), pertencente ao Laboratório de Microscopia Ótica e Difração de Raios X (DEMIN – UFOP), e a determinação aproximada da composição mineralógica das amostras também foi avaliada a partir dessa técnica, por meio da semi-quantificação realizada com o *software HighScore Plus*.

4.3. Ensaios de concentração

Objetivando um maior aproveitamento do rejeito de minério manganês, as amostras foram submetidas a dois diferentes métodos de concentração: mesa oscilatória (concentração densitária) e separador magnético (concentração pela força do campo magnético).

4.3.1. Concentração gravítica

O processo de separação gravítica da amostra foi realizado em uma mesa oscilatória tipo Wilfley (Figura 4.10), que possui as seguintes especificações:

- Tamanho 13 – A, Comprimento 40”, Largura 18”;
- Motor ¼ HP, Capacidade (24h) – 0,5 a 1,8 toneladas;
- Frequência: 5,03 hertz

Os parâmetros considerados foram:

Faixas granulométricas: < 2 mm e > 0,038 mm e < 2 mm

Ângulo de inclinação da mesa: 8°

Porcentagem de sólidos: 25%

Após calibrar a mesa, foram preparadas as amostras nas faixas granulométricas estabelecidas, para cada ensaio, foram utilizadas amostras de aproximadamente 1 kg. Para a obtenção da polpa com 25% de sólidos, efetuou-se a medição da taxa de alimentação da amostra na mesa e ajustou-se a vazão da água de polpa, obtendo assim a porcentagem de sólidos desejada. Este parâmetro foi estipulado de acordo com Wills (1992) que afirma

que a água de lavagem deve variar de poucos litros a quase 100 L/min de acordo com o material alimentado sobre a mesa.

Com a finalização dos ensaios, os produtos (concentrado, misto e rejeito) obtidos foram filtrados, secados, pesados, homogeneizados e quarteados, alcançando assim, amostras representativas que foram encaminhadas para a análise química, onde se identificou os teores de Mn e SiO₂. Por fim, com os resultados dos teores obtidos na análise química, puderam-se calcular os respectivos balanços de massa e metalúrgico.

Figura 4.10 - Mesa oscilatória utilizada para concentração gravítica



4.3.2. Separação magnética

O processo de separação magnética foi realizado no separador magnético a úmido de alta intensidade mostrado na Figura 4.11. Foram utilizadas as mesmas faixas granulométricas dos ensaios de mesa oscilatória, e variou-se a da intensidade da corrente aplicada (1A e 2A).

Figura 4.11 - Separador magnético utilizado para concentração magnética.



Inicialmente, preparou-se uma polpa com a amostra e foram selecionadas pequenas esferas de aço de tamanho variado e colocadas dentro da caixa por onde passava a amostra e que possuía contato direto com as bobinas do separador magnético. Com isso, o campo magnético era ligado e ajustado de acordo com as correntes previamente fixadas (1A e 2A). Para todos os ensaios foram utilizados aproximadamente 500 gramas de amostra e a polpa preparada possuía 25% de sólidos.

Com o campo magnético ligado, a amostra foi inserida na caixa e obtiveram-se dois materiais: 1 – Não magnéticos e 2 – Magnéticos. Os materiais não magnéticos atravessaram a região e foram coletados em uma bandeja, enquanto os magnéticos ficaram retidos na matriz, após o desligamento do campo magnético, foram lavados e também coletados em uma bandeja. Ambos os materiais foram secados, pulverizados e enviados para análise química com o intuito de determinar os teores de Mn e SiO₂ das frações magnéticas e não-magnéticas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Ensaios de umidade e densidade

O teor de umidade foi determinado por meio da avaliação da diferença de massa da amostra antes e depois de ser levada à estufa. Sendo assim, observam-se na Tabela 5.1 os valores obtidos para as duas condições:

Tabela 5.1 - Comparativo dos valores de massa da amostra no teste de umidade.

Amostra	
Massa inicial (g)	Massa final (g)
31,31	29,76

Com isso, utilizando-se a Equação (1), calculou-se o teor de umidade (w):

$$umidade (w) = \frac{(Mp - Ms)}{Ms} * 100 \quad (1)$$

$$w = \frac{(31,31 - 29,76)}{29,76} * 100$$

$$w = 5,21 \%$$

Com isso, pôde-se concluir que a amostra apresenta um teor de umidade (w) igual a 5,21 %, representando um baixo teor de umidade, que propicia uma possível disposição desse rejeito, como por exemplo, em pilhas compactadas, uma vez que, atualmente esse material é descartado em bacias de sedimentação ou diretamente na barragem de rejeitos.

No cálculo de densidade da amostra, calculou-se os valores de densidade ($\rho_{\text{médio}}$) para os três diferentes intervalos analisados, conforme observado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Resultados dos ensaios de picnometria para os diferentes intervalos.

	Global		>38 μm		<38 μm	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2
P1	28,68	27,92	42,21	25,10	27,01	29,02
P2	50,12	50,03	83,22	54,79	40,70	41,74
P3	67,78	69,72	123,56	94,14	62,82	61,80
P4	53,75	55,29	95,21	73,63	54,38	53,92
ρ	2,89	2,88	3,24	3,23	2,61	2,63
$\rho_{\text{médio}} =$	2,89		$\rho_{\text{médio}} =$	3,24	$\rho_{\text{médio}} =$	2,62
D.P =	0,7%		D.P =	0,3%	D.P =	1,0%

D.P = Desvio Padrão.

Por meio dos ensaios em duplicata, podem-se observar na Tabela 5.3 os valores de $\rho_{\text{médio}}$ para cada respectivo intervalo:

Tabela 5.3 - Valores de $\rho_{\text{médio}}$ para os respectivos intervalos analisados.

	$\rho_{\text{médio}}$ (g/cm ³)
Global	2,89
> 38μm	3,24
< 38μm	2,62

Por meio desses resultados, estima-se que para todas as faixas, provavelmente exista uma grande porcentagem de SiO₂, cuja $\rho = 2,65$. Estima-se também que a fração < 38 μm possua uma maior concentração de SiO₂ e menor de Mn, enquanto, a fração > 38 μm pode apresentar uma maior concentração de Mn, devido ao maior valor de densidade. Os diferentes intervalos da amostra foram encaminhados para análise química, visando analisar a composição química de cada.

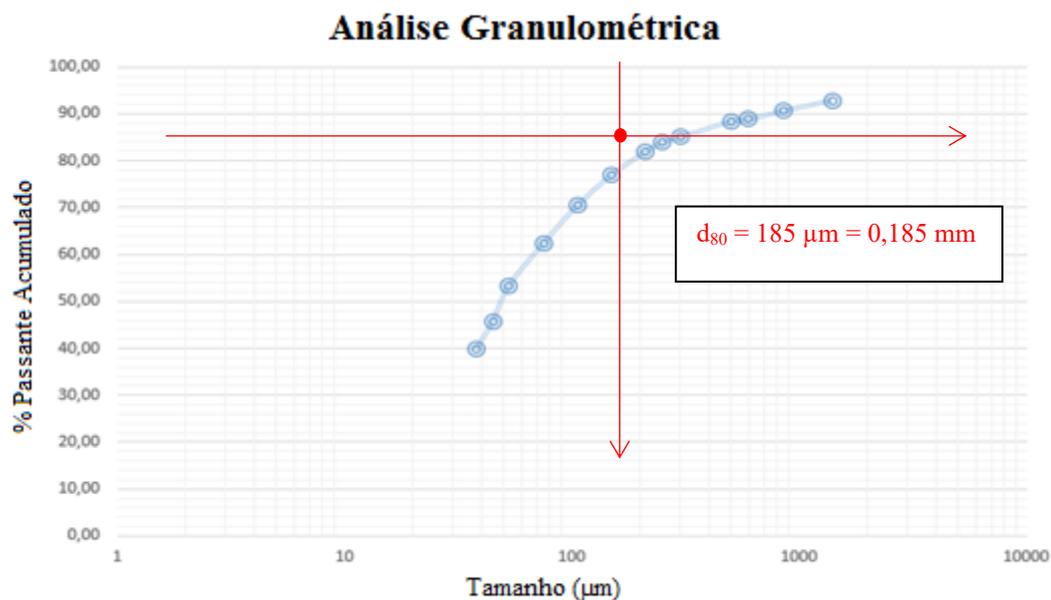
5.2. Análise granulométrica

A distribuição granulométrica da amostra realizada por peneiramento a úmido, que se encontra de forma detalhada na Tabela 5.4 e na Figura 5.1. Constatou-se que 53,33% das partículas estão abaixo de 270# (0,053 mm), graficamente, observa-se $d_{50} = 0,05$ mm e $d_{80} = 0,185$ mm, ou seja, representa que 80% da amostra estão abaixo de 0,185 mm.

Tabela 5.4 - Distribuição granulométrica após o peneiramento a úmido.

mesh (#)	Tamanho (μm)	% Retido	% Retido Acumulado	% Passante Acumulado
12	1400	7,10	7,10	92,90
20	850	2,33	9,42	90,58
28	600	1,71	11,13	88,87
32	500	0,55	11,68	88,32
48	300	3,22	14,90	85,10
60	250	1,20	16,10	83,90
70	212	1,95	18,06	81,94
100	150	4,98	23,03	76,97
150	106	6,55	29,58	70,42
200	75	8,14	37,72	62,28
270	53	8,95	46,67	53,33
325	45	7,67	54,34	45,66
400	38	5,89	60,23	39,77
< 400	-	39,77	100,00	0,00
Total	-	100	100	-

Figura 5.1 - Distribuição granulométrica da amostra global.



5.3. Análise química da amostra

Na Tabela 5.5 é possível analisar a composição química das amostras e os teores dos elementos presentes.

Tabela 5.5 - Resultados da análise química para os três intervalos analisados.

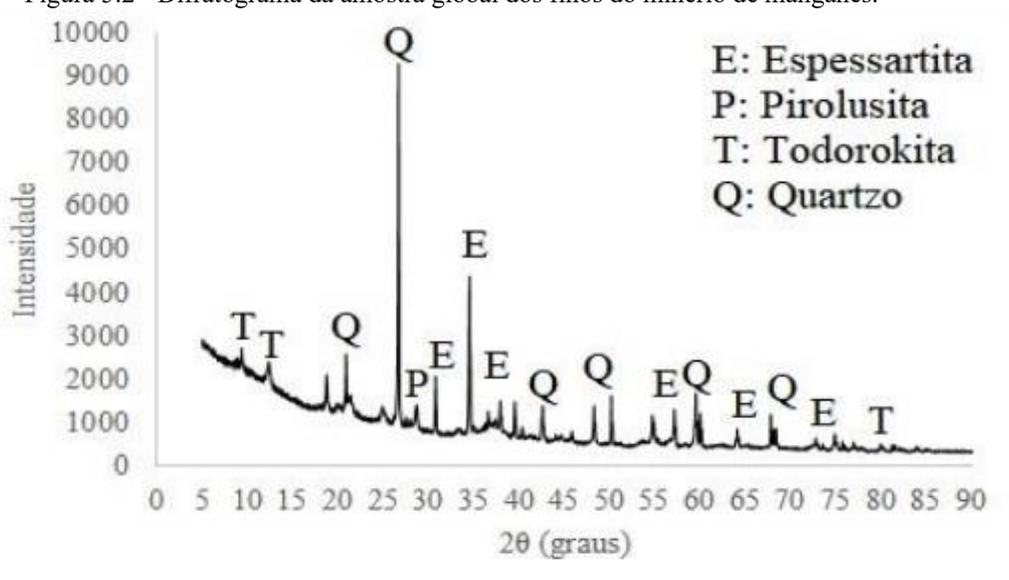
Análise Química – Intervalos					
Global (%)		> 38 μ m (%)		< 38 μ m (%)	
Mn	17,55	Mn	21,15	Mn	13,05
SiO ₂	37,00	SiO ₂	39,20	SiO ₂	33,00
Fe	7,85	Fe	6,84	Fe	13,22
Al ₂ O ₃	14,75	Al ₂ O ₃	13,36	Al ₂ O ₃	18,15

Analisando os resultados da análise química, concluiu-se que o intervalo que possui maior concentração de Mn é o intervalo > 38 μ m, enquanto o intervalo < 38 μ m possui a menor concentração. Visto isso, foram efetuados ensaios de concentração (gravítica e magnética) visando aumentar o teor de Mn na amostra global e na fração > 38 μ m.

5.4. Caracterização mineralógica

Na Figura 5.2 está representado o difratograma da amostra global dos finos do minério de manganês, no qual, por meio da leitura dos picos obtidos, foi possível evidenciar os minerais presentes na amostra.

Figura 5.2 - Difratograma da amostra global dos finos do minério de manganês.



FONTE: BARBOSA (2021).

A partir dos minerais encontrados, elaborou-se a Tabela 5.6 que evidencia a fórmula química e a densidade dos mesmos.

Tabela 5.6 - Minerais encontrados na caracterização mineralógica e algumas características.

Mineral	Fórmula Química	Densidade
Espessartita	$Mn_3Al_2Si_3O_{12}$	4,19
Quartzo	SiO_2	2,65
Todorokita	$Mn_6O_{12}3H_2O$	3,67
Pirolusita	MnO_2	4,90

5.5. Concentração gravítica

Para avaliar os resultados dos ensaios de concentração gravítica para os diferentes intervalos analisados, elaborou-se a Tabela 5.7 e a Tabela 5.8 que retrata os balanços de massas e metalúrgicos dos respectivos intervalos, na qual fora possível analisar a recuperação obtida nos intervalos de interesse e assim, verificar os novos teores dos elementos presentes e qual intervalo obteve melhor resultado.

Por meio da análise dos teores na recuperação, pôde-se destacar aspectos importantes em relação aos teores de Mn e de todas as impurezas analisadas, Fe, SiO_2 e Al_2O_3 . Demonstra-se na Tabela 5.9 o comparativo da recuperação metalúrgica no concentrado para os dois diferentes ensaios efetuados.

Tabela 5.4 - Balanço de massa e metalúrgico do ensaio de concentração global.

Produto	Peso		Teor (%)				Recuperação metalúrgica (%)			
	g	%	Mn	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Concentrado	267,36	29,10	28,04	5,71	31,60	10,42	45,79	19,39	24,76	20,96
Misto	578,15	62,93	14,14	9,66	39,80	15,94	49,93	70,94	67,43	69,36
Rejeito	73,18	7,97	9,58	10,4	36,40	17,59	4,28	9,67	7,81	9,68
Alim. Recalculada	918,69	100,00	17,82	8,57	37,14	14,46	100,0	100,00	100,00	100,00

Tabela 5.5 - Balanço de massa e metalúrgico do ensaio de concentração > 38µm.

Produto	Peso		Teor (%)				Recuperação metalúrgica (%)			
	g	%	Mn	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Concentrado	168,76	20,88	27,82	6,33	29,60	13,72	29,11	21,04	19,13	19,28
Misto	603,73	74,69	18,24	6,10	32,20	15,32	68,26	72,51	74,43	76,99
Rejeito	35,85	4,43	11,86	9,15	47,00	12,53	2,63	6,45	6,44	3,73
Alim. Recalculada	808,34	100,00	19,96	6,28	32,31	14,86	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabela 5.6 - Relação teor inicial x teor final e recuperação metalúrgica para os diferentes intervalos.

Relação teor inicial x teor final e recuperação metalúrgica						
Global			> 38µm.			
	Teor inicial (%)	Teor final (%)	Recuperação metalúrgica (%)	Teor inicial (%)	Teor final (%)	Recuperação metalúrgica (%)
Mn	17,55	28,04	45,79	21,15	27,82	29,11
Fe	7,85	5,71	19,39	6,84	6,33	21,04
SiO₂	37,00	31,60	24,76	39,20	29,60	19,13
Al₂O₃	14,75	10,42	20,96	13,36	13,72	19,28

Como pode ser visto na Tabela 5.9, para ambos os ensaios, notou-se um aumento na recuperação metalúrgica de Mn, com um resultado mais satisfatório para a amostra Global (recuperação metalúrgica de aproximadamente 46%) comparando-a com a amostra > 38µm, mostrando que houve uma maior recuperação de Mn da fração < 38µm (presente na amostra Global).

Outro aspecto relevante é a significativa redução do teor de SiO₂ observada em ambos os ensaios, em especial ao ensaio para a amostra > 38µm, obtendo uma redução de aproximadamente 10% no teor de SiO₂, caindo de 39,20% para 29,60%, esse resultado evidencia a eficiência da separação gravítica utilizada, uma vez que, SiO₂ apresenta uma menor densidade em relação aos demais minerais presentes na amostra. Em relação às demais impurezas (Fe e Al₂O₃), o ensaio da amostra global se mostrou mais eficiente, apresentando menores teores finais que o da amostra > 38µm.

Comparando os valores (Tabela 5.10) encontrados no processo de concentração gravítica com as especificações dos produtos utilizados atualmente descritos por BARBOSA (2021), conclui-se que, para os ensaios de concentração gravítica, a concentração da amostra global, em relação a teores, é o que mais se aproxima das especificações atualmente utilizadas.

Tabela 5.10 – Comparativo do ensaio de concentração gravítica x especificações dos produtos utilizados.

	Especificação química			
	%Mn	%Fe	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃
Produto utilizado	29 a 30	5 a 6 (máx)	24 a 26 (máx)	11 (máx)
Amostra Global	28,04	5,71	31,60	10,42

Atualmente, o minério explotado na mina apresenta relação Mn/Fe de 5,9. Por meio do ensaio de concentração gravítica da amostra global, obteve-se uma relação Mn/Fe de 4,9, valor que se aproxima do utilizado pela empresa, porém, necessitando de um maior ajuste do teor em um posterior método.

Por meio desses valores encontrados, em termos de teores, o material que atualmente é descartado em rejeito, apresenta uma possível viabilidade futura, porém, é necessário ajustes granulométricos para atender às especificações comerciais da empresa.

5.6. Separação magnética

Após serem efetuados os ensaios de separação magnética, as amostras foram encaminhadas para a empresa, na qual, foi efetuada a análise química das amostras. Com os resultados da análise química, elaboraram-se quatro tabelas diferentes, Tabela 5.11; Tabela 5.12; Tabela 5.13 e Tabela 5.14, onde foi possível analisar a recuperação obtida nos diferentes intervalos com as respectivas variações de intensidade da corrente aplicada. Em seguida, verificou-se os novos teores dos elementos presentes apontando qual intervalo apresentou o melhor resultado.

Por meio da análise dos teores na recuperação, pôde-se destacar aspectos importantes em relação aos teores de Mn e de todas as impurezas analisadas, Fe, SiO₂ e Al₂O₃. Demonstram-se nas Tabela 5.15 e Tabela 5.16 o comparativo da recuperação metalúrgica no concentrado para os dois diferentes ensaios efetuados.

Tabela 5.11 - Balanço de massa e metalúrgico do ensaio de separação magnética – Global (< 2 mm) - 1A

Produto	Peso		Teor (%)				Recuperação metalúrgica (%)			
	g	%	Mn	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Concentrado	30,14	6,94	25,08	6,38	29,60	15,99	9,74	5,49	5,72	7,50
Rejeito	403,9	93,06	17,33	8,19	36,40	14,70	90,26	94,51	94,28	92,50
Alim.	434,1	100,0	17,87	8,06	35,93	14,79	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabela 5.12 - Balanço de massa e metalúrgico do ensaio de separação magnética – Global (< 2 mm) - 2A

Produto	Peso		Teor (%)				Recuperação metalúrgica (%)			
	g	%	Mn	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Concentrado	77,78	18,23	25,31	7,06	29,40	15,44	26,69	16,60	14,33	19,68
Rejeito	348,96	81,77	15,50	7,91	39,20	14,08	73,31	83,40	85,67	80,32
Alim. Recalculada	426,74	100,00	17,29	7,75	37,41	14,33	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabela 5.13 - Balanço de massa e metalúrgico do ensaio de separação magnética – > 38µm - 1A

Produto	Peso		Teor (%)				Recuperação metalúrgica (%)			
	g	%	Mn	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Concentrado	47,21	11,73	26,45	6,38	31,00	16,30	15,99	14,28	9,01	15,67
Rejeito	355,43	88,27	18,47	5,09	41,60	11,66	84,01	85,72	90,99	84,33
Alim. Recalculada	402,64	100,00	19,41	5,24	40,36	12,20	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabela 5.14 - Balanço de massa e metalúrgico do ensaio de separação magnética -> 38µm - 2A

Produto	Peso		Teor (%)				Recuperação metalúrgica (%)			
	G	%	Mn	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Concentrado	106,39	25,93	26,90	5,71	30,00	15,47	33,23	24,00	21,05	30,88
Rejeito	303,86	74,07	18,92	6,33	39,40	12,12	66,77	76,00	78,95	69,12
Alim. Recalculada	410,25	100,00	20,99	6,17	36,96	12,99	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabela 5.15 - Relação teor inicial x teor final e recuperação metalúrgica para amostra global e variações das intensidades de corrente aplicada.

Relação teor inicial x teor final e recuperação metalúrgica – Amostra Global						
	1A			2A		
	Teor inicial (%)	Teor final (%)	Recuperação metalúrgica (%)	Teor inicial (%)	Teor final (%)	Recuperação metalúrgica (%)
Mn	17,55	25,08	9,74	17,55	25,31	26,69
Fe	7,85	6,38	5,49	7,85	7,06	16,60
SiO₂	37,00	29,60	5,72	37,00	29,40	14,33
Al₂O₃	14,75	15,99	7,50	14,75	15,44	19,68

Tabela 5.16 - Relação teor inicial x teor final e recuperação metalúrgica para amostra > 38µm e variações das intensidades de corrente aplicada.

Relação teor inicial x teor final e recuperação metalúrgica – Amostra > 38µm.						
	1A			2A		
	Teor inicial (%)	Teor final (%)	Recuperação metalúrgica (%)	Teor inicial (%)	Teor final (%)	Recuperação metalúrgica (%)
Mn	21,15	26,45	15,99	21,15	26,90	33,23
Fe	6,84	6,38	14,28	6,84	5,71	24,00
SiO₂	39,20	31,00	9,01	39,20	30,00	21,05
Al₂O₃	13,36	16,30	15,67	13,36	15,47	30,88

Por meio da Tabela 5.16, pode-se observar que para ambos os ensaios, utilizando a corrente aplicada de 1A, a recuperação de Mn não foi satisfatória. Indicando que, para esse tipo de concentração, é necessária uma maior intensidade de corrente aplicada.

Como é possível observar na utilização de intensidade de corrente aplicada igual a 2A, na qual, notou-se que para ambos os intervalos analisados, ocorreu um aumento na recuperação de Mn, com um resultado mais satisfatório para a amostra > 38 μ m (com recuperação metalúrgica de 33,23%), a amostra > 38 μ m também apresentou o maior teor de Mn, com teor de 26,90%.

Outro ponto importante a se destacar, que para ambos os ensaios ocorreu uma redução significativa no teor de SiO₂, mostrando a eficácia da separação magnética para a separação dessa impureza. Em relação as demais impurezas (Fe e Al₂O₃), houve pequeno aumento no teor de Al₂O₃ em ambos ensaios e houve maior recuperação metalúrgica, para ambas impurezas, na amostra > 38 μ m e utilizando corrente de 2A.

Comparando os valores (Tabela 5.17) encontrados no processo de separação magnética com as especificações dos produtos utilizados atualmente descritos por BARBOSA (2021), conclui-se que, para os ensaios de separação magnética, o processo de concentração da amostra > 38 μ m utilizando corrente de 2A, em relação a teores, é o que mais se aproxima das especificações atualmente utilizadas.

Tabela 5.17 – Comparativo do ensaio de separação magnética x especificações dos produtos utilizados.

	Especificação química			
	%Mn	%Fe	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃
Produto utilizado	29 a 30	5 a 6 (máx)	24 a 26 (máx)	11 (máx)
Amostra > 38 μ m	26,45	6,38	31,00	16,30

Atualmente, o minério explotado na mina apresenta relação Mn/Fe de 5,9. Por meio do ensaio de separação magnética da amostra > 38 μ m, obteve-se uma relação Mn/Fe de 4,1, valor abaixo do que se utiliza pela empresa, mostrando a necessidade de realizar outros ensaios posteriores com ajustes na intensidade de corrente aplicada ou implementar outros métodos de concentração em conjunto, visando maior ajustes de teores, para que possa atender às especificações comerciais da empresa.

6. CONCLUSÕES

- a) De acordo com o teste de umidade e densidade da amostra, notou-se que a amostra apresentou um baixo teor de umidade (5,21%), o que propicia uma maior compactação e deposição do material. Em relação a densidade da amostra, constatou-se que a densidade da amostra global dos finos do minério de manganês é igual a 2,89 g/cm³.
- b) Por meio da análise química da amostra global, averiguou-se, os principais elementos analisados, Mn, Fe, SiO₂ e Al₂O₃, apresentaram os teores de 17,55%; 7,85%; 37,00% e 14,75% respectivamente. E que o intervalo > 38µm, possuía maior teor de Mn (21,15%) do que o intervalo < 38µm (13,05%).
- c) Em relação a caracterização mineralógica da amostra global dos finos de minério de manganês, concluiu-se que a mesma é composta principalmente pelos minerais de manganês espessartita, todorokita e bixbyita e o mineral de ganga quartzo.
- d) A análise granulométrica da amostra global dos finos do minério de manganês, mostrou que 80% da amostra encontra-se abaixo de 0,185 mm, também se notou que, mais de 50% desses finos de manganês encontram-se distribuídos entre 0,053 e 0,045 mm (270 a 325 mesh).
- e) Para os ensaios de concentração utilizando a mesa oscilatória, notou-se que para ambos os ensaios, apresentou-se uma recuperação metalúrgica considerável de Mn, dando maior destaque para a recuperação metalúrgica da amostra global, que apresentou uma recuperação metalúrgica de 45,79%. Observou-se também, uma redução significativa do teor de SiO₂ em ambos ensaios, mostrando a eficiência de uma separação gravítica, uma vez que o mineral SiO₂ apresenta uma menor densidade dentre os demais.
- f) Para os ensaios de separação magnética, observou-se que para a corrente aplicada de 1A, não houve recuperação satisfatória de Mn, se mostrando assim, um método que demanda uma maior intensidade de corrente aplicada. Para ambos os ensaios utilizando corrente aplicada de 2A houve uma recuperação metalúrgica significativa de Mn (33,23%), porém, também houve elevada recuperação metalúrgica das impurezas (Fe e Al₂O₃). Notou-se também, redução significativa

do teor de SiO_2 para ambos os ensaios com maior intensidade de corrente aplicada (2A).

- g) Tendo em vista que o minério atualmente explotado na mina, apresenta uma relação Mn/Fe de 5,9, comparado com os resultados obtidos, concluiu-se que o ensaio da mesa oscilatória para a amostra global foi o que mais se aproximou dos parâmetros utilizados pela empresa, na qual, obteve-se uma relação Mn/Fe para esse minério é de 4,9.
- h) Por meio desses valores encontrados com ensaios de concentração, em termos de teores, o material que atualmente é descartado em rejeito, apresenta uma possível viabilidade futura por meio de concentração gravítica com mesa oscilatória para a amostra global, apresentando teores aproximados aos utilizados atualmente pela empresa, porém, é necessário ajustes granulométricos para atender às especificações comerciais da empresa.

REFERÊNCIAS

ANM - Agência Nacional de Mineração. Balanço Mineral Brasileiro – Brasil 2001 – ano base 2000. Coordenação de Maria do Rosário Miranda Costa e Romulo Castro Figueiredo. Brasília: ANM, 2001. Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-manganes>>. Acesso em: 10 jan. 2024.

ANM - Agência Nacional de Mineração. Sumário Mineral Brasileiro – Pará 2018 – ano base 2017. Coordenação de Maria do Rosário Miranda Costa et al. Brasília: ANM, 2018. Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/manganes>>. Acesso em: 10 jan. 2024.

ANM – Agência Nacional de Mineração. Anuário Mineral Brasileiro – Brasil 2022 – ano base 2021. Coordenação de Yuri Faria Pontual de Moraes: ANM, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2024.

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.

BENIQUE, F.S.B. Contribuição à auto-redução carbotérmica de aglomerados contendo óxidos de manganês. 2007. 161p. Dissertação de mestrado. Mestrado em Ciência dos Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

CANESCHI, G. M. M. (1994). Estudos de concentração do minério de manganês da Mina de Peruaçu – M.G. Belo Horizonte, 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais

COSTA, A. B. Caracterização de minérios do distrito manganesífero de São João Del Rei (MG) com ênfase no rendimento da produção de ferro-ligas. 2020. 97p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

DIAS, T. G. e CAXISTO, F.. Recursos Minerais de Minas Gerais – Manganês. Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais, CODEMGE, Minas Gerais, 2008, 18p.

GONÇALVES, E. e SERFATY, A. Perfil Analítico do Manganês. Boletim nº 37. Ministério das minas e energias. Departamento Nacional da Economia Mineral, DNPM, Brasília, 1976, 149p.

JESUS, L.G.M. Avaliação da pré-redução de briquetes de finos de minérios de manganês em ambientes análogos aos fornos elétricos a arco submerso. 2020. 147p. Dissertação (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica, Escola de Engenharia, UFRGS.

LIMA, R.M.F.; VASCONCELOS, J.A.; SILVA, G.R. Flotação aniônica de rejeito de minério de manganês. REM: Revista Escola de Minas, v. 61, n. 3, p. 337-342, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672008000300012>. Acesso em: 23 fev. 2024.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M.. Tratamento de Minérios 2010. 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 932 p.

POSTLE, M. NWAOGU, T. UPSON, S. CLARK, C. e HEINEVETTER, A. Manganese, The Global Picture – A Socio Economic Assessment. International Manganese Institute Report. Loddon, Norfolk, 2015. 58 p.

REIS, E.L.; LIMA, R.M.F. Concentração de finos provenientes da planta de beneficiamento do minério de manganês da Mineração Morro da Mina/RDM por mesa oscilatória. Revista Escola de Minas, v.58, n.3, 2005.

REIS, E.L. Caracterização dos resíduos provenientes da planta de beneficiamento do minério de manganês sílico-carbonatado da RDM - Unidade Morro da mina. 2005. 124p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas, UFOP

SAMPAIO, J. A.; SILVA, F. A. N. G.. Determinação das densidades de sólidos e de polpa. IN: Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. p. 37-51.

SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C.; DUTRA, A. J. B.; PENNA, M. T. M.. Manganês. IN: Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações. 2 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 633

SILVA, E,F,M. Concentração de minério de manganês por flotação. Trabalho de Conclusão de Curso. 2021. Disponível em: <https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/710/o/EDUARDO_FELIPE_MARTINS_SILVA.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2024.

SILVA, L. M. C. G.; FELLOWS FILHO, L.. Alternativa para o beneficiamento do minério de manganês de Urucum, Corumbá - MS. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 1984. (Série Tecnologia Mineral, 32)

SOUZA, H.S.; TESTA, F.G.; BRAGA, A.S.; KWITKO-RIBEIRO, R.; OLIVEIRA, A.H.; LEAL FILHO, L.S.. Desenvolvimento de uma rota de flotação como alternativa para concentração de minérios de manganês de baixo teor. XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/321586748_DESENVOLVIMENTO_DE_U_MA_ROTA_DE_FLOTACAO_COMO_ALTERNATIVA_PARA_CONCENTRACAO_DE_MINERIOS_DE_MANGANES_DE_BAI_XO_TEOR>.

Acesso em: 24 fev. 2024.

WILLS, B. A. Mineral processing Technology. Pergamon Press, 5ª edição, New York, 855 p, 1992.