



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS

Campus Ouro Branco

Curso de Bacharelado em Engenharia Metalúrgica



Trabalho de Conclusão de Curso

" AVALIAÇÃO DE FONTE ALTERNATIVA DE MgO NA MISTURA DE  
SINTERIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO "

Autor: Dérlisson de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Liziero Ruggio da Silva

Agosto/2024

INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS

Campus Ouro Branco

Curso de Bacharelado em Engenharia Metalúrgica

Dérlisson de Oliveira

" AVALIAÇÃO DE FONTE ALTERNATIVA DE MgO NA MISTURA DE  
SINTERIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO"

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Bacharelado em Engenharia Metalúrgica

Área de concentração: Metalurgia Extrativa  
Orientador: Prof. Dr. Guilherme Liziero Ruggio da Silva

Ouro Branco

IFMG

2024

O48a Oliveira, Dérlisson de.

Avaliação de fonte alternativa de MgO na mistura de sinterização de minério de ferro/ Dérlisson de Oliveira. – 2024.

50.: il.col.

Orientador: Guilherme Liziero Ruggio da Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Branco, 2024.

1. Dolomita. 2. Minério magnesiano. 3. Sínter. 4. Resistência mecânica do sínter. I. Oliveira, Dérlisson de. II. Silva, Guilherme Liziero Ruggio da. III. Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Branco. IV. Título.

CDU: 622.2

Dedico este trabalho de conclusão de curso à minha mãe, Janete de Oliveira, minha esposa Leiliane, minha família e aos muitos que me encorajaram, que me deram apoio para que eu estivesse alcançando este sonho em minha vida. À memória de Marcos Paulo Martins Leite, que esteve presente em momentos de luta e de alegrias, que foram notórias nesta conquista.



INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA  
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

DOCUMENTO ÚNICO DE DEFESA DE TCC (ANEXO IV)

ATA DA DEFESA DE TCC

No dia 24/08/2024, às 08:00 horas, o aluno Deilson de Oliveira do curso de Eng. Metalúrgica turma \_\_\_\_\_ do IFMG – Campus Ouro Branco defendeu o ( ) TCC I (X) TCC II e foi aprovado (aprovado/reprovado) com a nota 80, que está condicionada ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa do TCC. Caso seja aprovado, deverá apresentar o trabalho com as devidas modificações e no formato solicitado em 24/09/2024.

O aluno está ciente de que, caso não cumpra os procedimentos pós-defesa de TCC até a data estipulada, sua nota será considerada zero e a sua defesa será anulada. Também está ciente de que o trabalho de conclusão de seu curso poderá ser divulgado pela Instituição através dos seus meios de comunicação.

Observações pertinentes da defesa:

---

---

---

DECLARAÇÃO ANTI-PLÁGIO

Eu, Deilson de Oliveira, estudante do curso Engenharia Metalúrgica do IFMG – Campus Ouro Branco, declaro, para os devidos fins e efeitos, e para fazer prova junto ao IFMG – Campus Ouro Branco, que, sob as penalidades previstas no art. 299 do Código Penal Brasileiro, que é de minha criação o trabalho de conclusão de curso que ora apresento.

**Art. 299 do Código Penal Brasileiro, que dispõe sobre o crime de Falsidade Ideológica:**

"Omitir, em documento público ou particular, declaração que dele devia constar, ou nele inserir ou fazer inserir declaração falsa ou diversa da que devia estar escrita, com o fim de prejudicar direito, criar obrigação ou alterar verdade sobre fato juridicamente relevante: Pena — reclusão, de 1 (um) a 5 (cinco) anos, e multa, se o documento é público, e reclusão de 1 (um) a 3 (três) anos, e multa, se o documento é particular.

Parágrafo único. Se o agente é funcionário público, e comete o crime prevalecendo-se do cargo, ou se a falsificação ou alteração é de assentamento de registro civil, aumenta-se a pena de sexta parte." Este crime engloba plágio e compra fraudulenta de documentos científicos.

Por ser verdade, e por ter ciência do referido artigo, firmo a presente declaração.

Assinatura do aluno: [Assinatura]

NOME COMPLETO E ASSINATURA DOS COMPONENTES DA BANCA E DO ORIENTADO

Orientador(a): Nome: GUILHERME LIZERO R SILVA Assinatura: [Assinatura]

Membro 2: Nome: MARCILIO DANIEL MACHADO Assinatura: [Assinatura]

Membro 3: Nome: ANTONIO MARCOS BORGES SILVA Assinatura: [Assinatura]

Membro 4: Nome: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Membro 5: Nome: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Aluno: Nome: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

## AGRADECIMENTOS:

O meu agradecimento à Deus, por permitir que eu chegasse até aqui, com saúde e determinação para vencer os diversos obstáculos encontrados pelo caminho e por proporcionar tamanha conquista de vida.

À minha mãe, com simplicidade e humildade, me fez conhecer valores que foram chaves para abrir portas e proporcionar realizações, as quais me orgulham.

Às minhas irmãs que sempre se dispuseram a me fortalecer e ficaram presentes em momentos difíceis.

À minha esposa que sempre esteve ao meu lado, pelo zelo incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo de toda essa etapa de minha vida em que me dediquei e abdiquei de tempos em família para então fazer este curso; às minhas filhas, Maria Luísa e a Isadora, que são a propulsão dessa etapa.

Ao meu professor e orientador, Guilherme Liziero Ruggio da Silva, que se tornou uma pessoa inspiradora, que acompanhou boa parte do meu desenvolvimento acadêmico e profissional, com maestria conduzindo, apontando e ensinando da melhor maneira todo seu conhecimento.

À Gerdau – Usina Ouro Branco, pela oportunidade de fazer parte dessa família e em particular aos companheiros da Unidade piloto, Pedro Lúcio e o Marcos Damasceno que são peças chaves em discussões técnicas para este desafio, e ao time dos pátios e sinterizações. Ao Marcílio Daniel, ao Thomas Letto, ao Robert Nogueira, ao Anderson Cipriani pela assessoria técnica no meu dia a dia; à equipe dos laboratórios de matérias primas e do laboratório da mina pelas dedicações em cada demanda.

E, finalmente, ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Ouro Branco, por entregar uma educação e pela equipe de competência, qualidade e por ser uma instituição com um alto nível de responsabilidade e dedicação com seus discentes.

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....   | 1  |
| 2. OBJETIVOS.....  | 5  |
| 2.1 Objetivo geral.....  | 5  |
| 2.1.1 Objetivos específicos.....   | 5  |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....  | 6  |
| 3.1 Origens, definição e etapas do processo de sinterização de minério de ferro..... | 6  |
| 3.2 Processo de Sinterização.....  | 6  |
| 3.3 Etapas do Processo de Sinterização.....  | 9  |
| 3.4 Matérias-primas utilizadas no processo de sinterização.....                      | 11 |
| 3.5 Caracterização metalúrgica do sinter.....  | 13 |
| 3.5.1 Propriedades a Frio.....   | 13 |
| 3.5.2 Propriedades a Quente.....   | 13 |
| 3.6 Microestruturas de formação no sinter.....                                       | 14 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS.....  | 16 |
| 4.1 Plano de teste.....  | 16 |
| 4.2 Plano de Teste Piloto.....   | 17 |
| 4.3 Homogeneização e amostragem das matérias primas.....                             | 20 |
| 4.4 Definição das misturas a sinterizar.....   | 21 |
| 4.5 Condições de aceitação de queima.....  | 23 |
| 4.6 Testes pot grate.....  | 25 |
| 4.6.1 Análise de Umidade.....  | 25 |
| 4.6.3 Preparação da Panela de Sinterização.....                                      | 26 |
| 4.6.4 Carregamento da Panela de Sinterização.....                                    | 28 |
| 4.6.5 Ignição da Mistura a Sinterizar.....   | 28 |
| 4.6.6 Desagregação do Bolo de Sinter.....  | 29 |
| 4.6.7 Classificação Granulométrica do Sinter.....                                    | 30 |
| 4.6.8 Amostragem do Sinter.....  | 30 |
| 4.6.9 Teste de Queda.....  | 32 |
| 4.6.10 Teste de Tamboramento.....  | 33 |
| 4.6.11 Índice de Redutibilidade.....   | 34 |
| 4.6.12 Índice de Degradação sob Redução.....   | 34 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....   | 36 |
| 5.1 Análise Química e Granulométrica das Matérias Primas.....                        | 36 |
| 5.2 Consumos Específicos das Matérias-Primas.....                                    | 37 |
| 5.3 Análises Metalúrgicas do Sinter.....   | 41 |
| 5.4 Análise Mineralógica do Sinter.....  | 42 |
| 6. CONCLUSÕES:.....  | 48 |
| 7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....   | 49 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....   | 50 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - As exportações minerais brasileiras 2022.....                                  | 1  |
| Figura 2 - Microestrutura Ideal do sinter de minério de ferro.....                        | 3  |
| Figura 3 - Produção mundial de aço bruto em milhões de toneladas 2022.....                | 8  |
| Figura 4 - Classificação das partículas.....  | 10 |
| Figura 5 - Unidade Piloto- Gerdau, Ouro Branco.....                                       | 16 |
| Figura 6 - Forno de Ignição.....  | 17 |
| Figura 7 - Fluxograma das etapas do projeto.....  | 17 |
| Figura 8 - Localização do fornecedor.....   | 18 |
| Figura 9 - Canteiro de amostras.....  | 19 |
| Figura 10 - Fluxograma da rota de processo em escala piloto.....                          | 21 |
| Figura 11 - Preparação da panela de mistura.....  | 26 |
| Figura 12 - Ignição da Mistura a Sinterizar.....  | 28 |
| Figura 13 - Canteiro de homogeneização do sinter produto em escala piloto.....            | 30 |
| Figura 14 - Fluxograma dos ensaios metalúrgicos do sinter.....                            | 31 |
| Figura 15 - Esquematização do teste de tamboreamento.....                                 | 32 |
| Figura 16 - Consumo específico de Minério (kg/t sinter).....                              | 36 |
| Figura 17 - Consumo específico de sinter retorno (kg/t sinter).....                       | 36 |
| Figura 18 - Consumo Específico de Combustível (kg/t sinter).....                          | 37 |
| Figura 19 - Consumo Específico de Calcário.....   | 38 |
| Figura 20 - Gráfico comparativo: fases globais presentes.....                             | 41 |
| Figura 21 - Principais tipos de microestruturas existentes no sinter 50% Magnesiano.....  | 42 |
| Figura 22 - Principais tipos de microestruturas existentes no sinter 100% Magnesiano..... | 44 |
| Figura 23 - Quantificação do tamanho dos poros.....                                       | 45 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1- Parâmetros de validação das queimas.....             | 23 |
| Tabela 2 – Análise Química das matérias primas utilizadas..... | 34 |
| Tabela 3 – Análise Física das matérias primas utilizadas.....  | 35 |
| Tabela 4 - Consumo específico das matérias primas.....         | 39 |
| Tabela 5 - Parâmetros do processo de sinterização piloto.....  | 40 |
| Tabela 6 - Testes Metalúrgicos no Sinter.....                  | 41 |

## LISTA DE NOTAÇÕES

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| MgO                            | Óxido de magnésio                              |
| FeT                            | Ferro total                                    |
| CaO                            | Óxido de cálcio                                |
| SiO <sub>2</sub>               | Sílica   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Oxido de alumínio                              |
| MnT                            | Manganês total                                 |
| P                              | Fósforo  |
| TiO <sub>2</sub>               | Dióxido de titânio                             |
| PPC                            | Perda por calor                                |
| FeO                            | Óxido de ferro                                 |
| CF                             | Carbono fixo                                   |
| CZ                             | Cinza  |
| USGS                           | United States Geological Survey                |
| R.M.T                          | Rendimento da mistura total                    |
| R.M.P                          | Rendimento da mistura parcial                  |
| TT>6,35                        | Teste de tambor                                |
| DNPM                           | Departamento Nacional de Produção Mineral      |
| IR                             | Índice de redutibilidade                       |
| IDR                            | Índice de degradação sob redução               |
| TQ                             | Teste de queda                                 |
| ISO                            | International Organization for Standardization |
| Ibram                          | Instituto Brasileiro de Mineração              |

## RESUMO

O sinter é um aglomerado poroso de minério de ferro, produzido a partir da mistura de minério de ferro fino, fundentes e combustíveis e aditivos. É notório que o aumento de sinter retorno está ligado diretamente à baixa da resistência mecânica do sinter produto, e com isso o baixo rendimento da mistura, por outro lado o minério magnesiano possui propriedades às quais são impactantes a minimizar esse efeito na produção de sinter. A fonte de MgO usada nas sinterizações provém da dolomita. Ao ser submetida ao processo de sinterização, a dolomita é decomposta, liberando óxido de magnésio (MgO). O MgO atua como um modificador das propriedades da escória, melhorando sua fluidez, viscosidade e capacidade de absorção de impurezas, no processo de redução nos altos-fornos. O objetivo deste estudo foi avaliar a utilização do minério magnesiano como fonte de MgO no processo de sinterização e seus impactos no processo, tais como a resistência mecânica do sinter produzido, e o rendimento da mistura a sinterizar, índice de degradação sob redução e índice de redutibilidade. Para a adição de 20 kg do minério magnesiano (substituição total da fonte de MgO) para a produção de 1 tonelada de sinter, observou-se a elevação de 2,6 pontos percentuais no índice de degradação sob redução, redução de 2,3 kg/t de sinter produzido no consumo de combustível, redução de 67,94 kg/t de sinter na geração de sinter retorno. O rendimento da mistura total apresentou uma elevação de 2,59 p.p, comparado com o 100% dolomita, sem impactos significativos que prejudiquem a qualidade do sinter. Portanto, a substituição da fonte de MgO da dolomita para o minério magnesiano se mostrou viável.

Palavras-chave: Dolomita. Minério magnesiano. Sinter. Resistência mecânica do sinter.

## ABSTRACT

The sinter is a porous agglomerate of iron ore, produced from the mixture of fine iron ore, fluxes and fuels and additives. It is notorious that the increase in sinter return is directly linked to the decrease in the mechanical resistance of the sinter product, and with this the low yield of the mixture, on the other hand the magnesian ore has properties that are impactful to minimize this effect on the production of sinter. The source of MgO used in the intermissions comes from dolomite. When subjected to the sintering process, dolomite is decomposed, releasing magnesium oxide (MgO). MgO acts as a modifier of the properties of the slag, improving its fluidity, viscosity and capacity to absorb impurities, in the reduction process in the blast furnaces. The objective of this study was to evaluate the use of magnesian ore as a source of MgO in the sintering process and its impacts on the process, such as the mechanical strength of the produced inter, and the yield of the mixture to be sintered, degradation index under reduction and reducibility index. For the addition of 20 kg of magnesian ore (total replacement of the MgO source) for the production of 1 ton of sinter, there was an increase of 2.6 p.p. in the degradation index under reduction, a reduction of 2.3 kg/t of sinter produced in fuel consumption, a reduction of 67.94 kg/t of sinter in the generation of return sinter. The yield of the total mixture showed an increase of 2.59 p.p., compared to the 100% dolomite; without significant impacts that impair the quality of the sinter. Therefore, the substitution of the MgO source from dolomite to magnesian ore proved feasible.

Keywords: Dolomite. Magnesian ore. Sinter. Mechanical strength of the sinter.

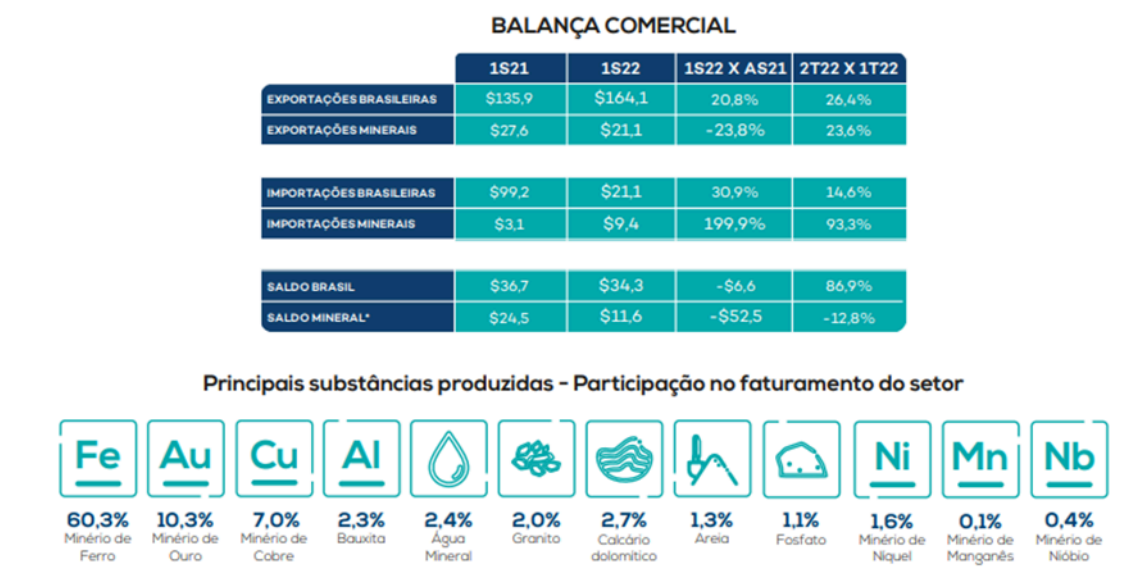


## INTRODUÇÃO

A sinterização é um processo que envolve a mistura de minério de ferro, fundentes, aglomerantes, coprodutos e combustíveis. A dolomita é frequentemente utilizada como fonte de MgO na mistura a sinterizar, considerando os parâmetros químicos adequados para atendimento ao convênio operacional do alto-forno. Na rota de processo da sinterização, podem ser usadas diferentes dolomitas de fornecedores distintos, como fonte de MgO. No entanto, isso tem afetado a resistência do sinter, o que tem impactado na perda de sinter produto durante o transporte até os altos-fornos. Isso ocorre devido à degradação a frio do sinter, o que resulta na geração de finos e diminuição da produtividade, justificado pela quantidade de retorno gerado no peneiramento de uma siderúrgica no quadrilátero ferrífero.

Dados de importações e exportações minerais são apresentados na Figura 1. Segundo o serviço geológico dos EUA, o Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro e no ano de 2022 as exportações minerais brasileiras alcançaram US\$ 21,1 bilhões no primeiro semestre, desse marco 60,3% é o minério de ferro.

Figura 1 - As exportações minerais brasileiras 2022



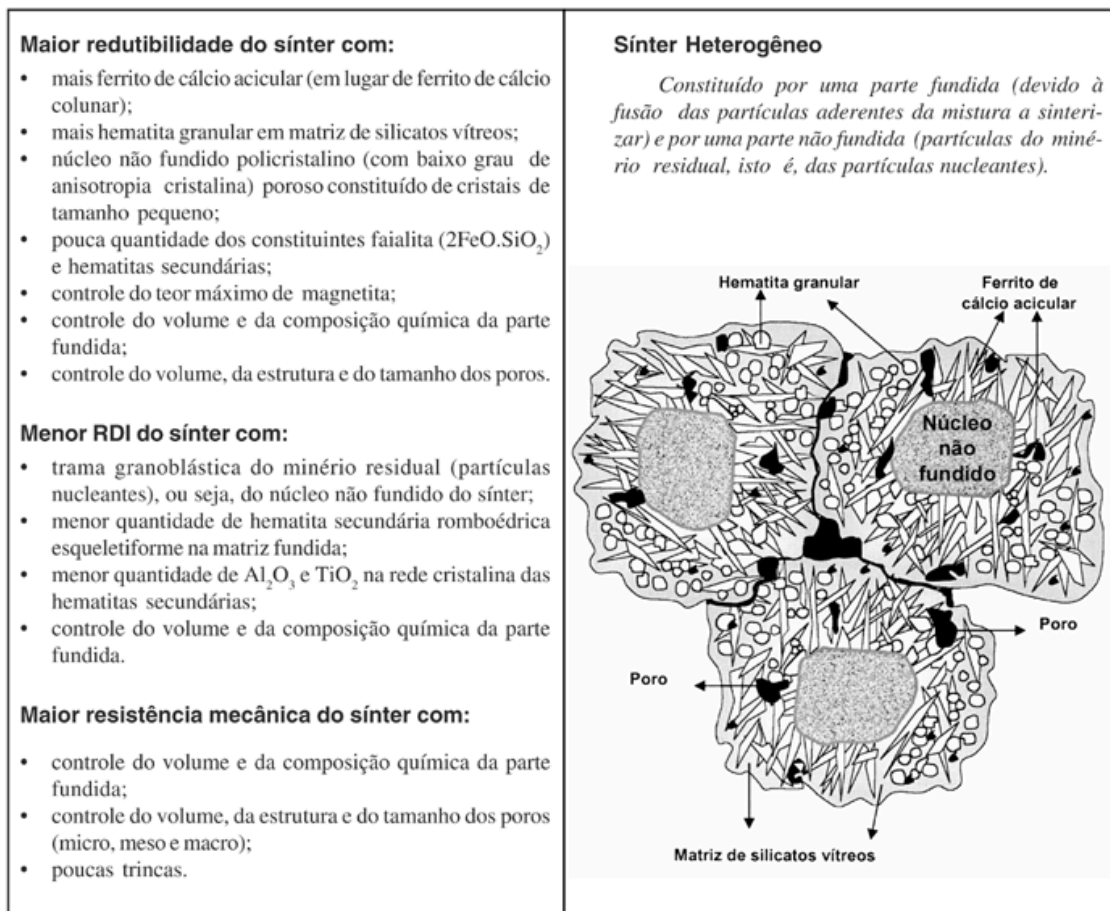
Fonte: (Ibram 2022).

Os minérios de ferro brasileiro apresentam estruturas internas variadas devido aos diferentes processos geológicos de formação (metamorfismo, tectonismo, e aos intemperes). Assim, possuem diferentes mineralogias, morfologias dos cristais, tamanho de poros, e qualidade distintas. As reservas de minério de ferro são de grande maioria de minérios hematíticos e podem ser divididos em distintas categorias (Rosière 1996, 1996; Vieira,1996; Rosière et ali, et ali, 1997).

A qualidade dos minérios de ferro que alimentarão a sinterização é determinada em função da composição do sínter a ser enviado para o alto-forno com as especificações pré-determinadas para o processo, a fim de atender as demandas da segurança operacional subsequentes, baseados em características do sínter como sua microestrutura, propriedades mecânicas, químicas e metalúrgicas. No controle da rota de sinterização, deve se atentar as variáveis de processo e a temperatura máxima de sinterização pois deve evitar que o sínter produzido tenha uma microestrutura rica em hematita secundária romboédrica esqueletiforme e ferritos de cálcio colunar (Ishikawa et alii, 1982; Ishikawa et alii, 1983; Dawson, 1993; Pimenta e Seshadri, 2002 a).

A resistência mecânica do sínter produto é um ponto crítico do processo industrial de sinterização de minérios de ferro (Vieira et al., 2003; Coelho, 2002), pois a baixa resistência leva a uma geração alta de sínter retorno. Os minérios goethíticos têm um impacto na estrutura da parte fundida do sínter, proporcionando a formação de ferritos de cálcio e escória vítrea. Além disso, é importante considerar que um ciclo térmico apropriado produz um sínter com uma microestrutura ideal, capaz de garantir um excelente comportamento no interior do alto-forno ( Figura 2). Existe uma forte relação entre os parâmetros físicos e metalúrgicos da redutibilidade e ao índice de degradação na redução (IDR) do sínter com a microestrutura do sínter heterogêneo (Vieira et al. 2003), conforme a Figura 2. Esses por sua vez, controlam os parâmetros metalúrgicos e mecânicos do sínter, tais como redutibilidade, resistência mecânica, RDI (Reduction Degradation Index) (Hsieh & Whiteman, 1993).

Figura 2 - Microestrutura Ideal do sinter de minério de ferro



Fonte: (Vieira et alii, 2003).

A produção global de magnesita/minério magnesiano é dominada pela China, Coreia do Norte, Rússia e Turquia, que juntos responderam por 63% do total em 2003. No Brasil, as maiores reservas estão no Nordeste, principalmente na Bahia e no Ceará. A mina de magnesita em Brumado, na Serra das Águas, é a mais produtiva do país, que contribuiu com cerca de 3% da produção mundial em 2001 (Adaptada de USGS Mineral Commodity Summaries, January 2004 e \* Sumário Mineral 2003 - DNPM). O sinter magnesiano, é obtido através da calcinação da magnesita em fornos convencionais a temperaturas entre 800°C e 1.000°C. Este processo resulta em um produto com teor de MgO que varia de 85% a mais de 90%.

Nesse sentido, o presente trabalho investigou os impactos da substituição do minério magnesiano no processo de sinterização, com foco no comportamento mecânico do sinter. Essa análise foi realizada com base no estado da arte do processo de sinterização e no desenvolvimento deste material na sinterização, utilizando as possibilidades do processo e tecnologias disponíveis.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Avaliar a substituição total e parcial de dolomita pelo minério magnesiano, como fonte de MgO na produção de sinter como forma de melhorar a resistência mecânica e produtividade, em escala piloto.

#### 2.1.1 Objetivos específicos

1. Realizar a caracterização física e química das matérias-primas do Sinter
2. Realizar a caracterização física, química, metalúrgica e mineralógica do sinter.
3. Avaliar e comparar o rendimento da mistura utilizada no processo.
4. Comparar o consumo de combustível entre os diferentes níveis de substituição.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Origens, definição e etapas do processo de sinterização de minério de ferro.

O processo de sinterização surgiu em 1897, com o desenvolvimento do método de tratamento para sulfeto de cobre, baseado em um leito de sinterização com sopro de ar da região inferior para a superior, por dois pesquisadores F. Haberlein e T. Huntington (Fernández-González et. al., 2017). Foi apresentado em 1902, uma patente para pirita calcinada, pós de minério de ferro com a adição de carvão e sopro ascendente de ar através do leito, sendo a primeira máquina contínua e desenvolvida por Dwight e Lloyd em 1903, no México. Já em 1905, E. J. Savelsberg aplicou a panela de Huntington-Heberlein para a sinterização de minério de ferro, sendo esta utilizada em quinze plantas de minério de ferro em 1912 (Fernández-González et. al., 2017).

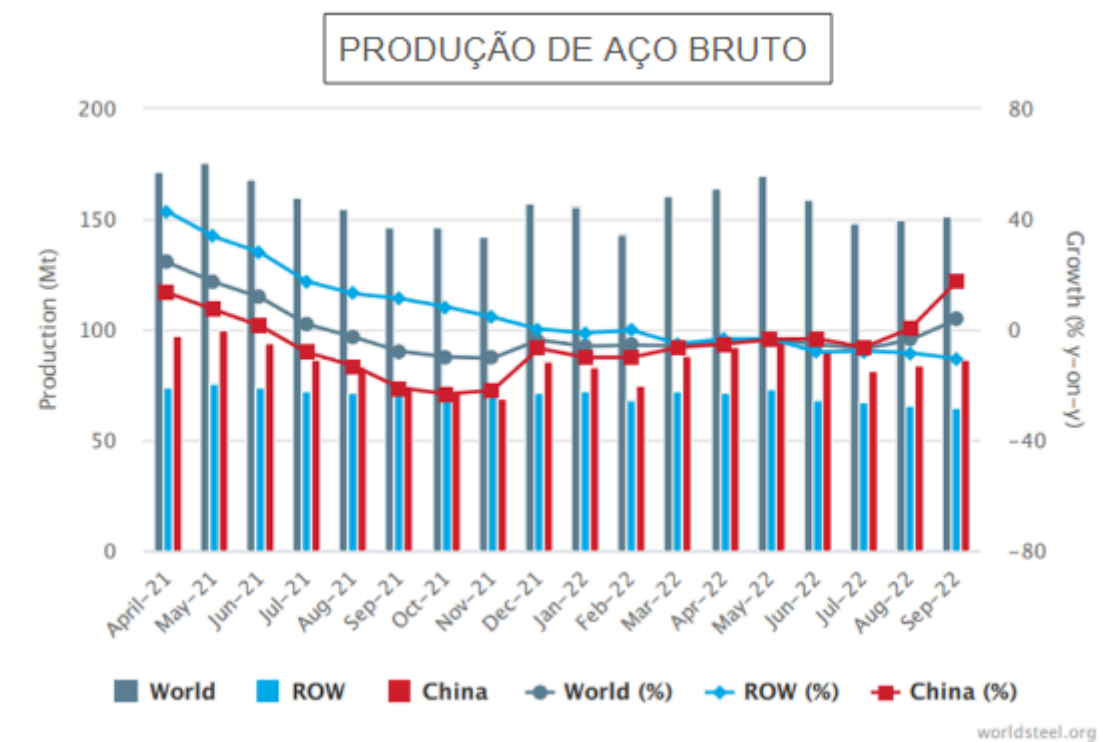
A sinterização, na indústria metalúrgica, é um processo importante de aglomeração de finos de minérios, com a utilização de aglomerantes, fundentes e combustíveis, além de conseguir aproveitar coprodutos industriais. Esse processo ocorre por um fluxo contracorrente onde as matérias primas são submetidas a uma frente de queima em um leito sobre grelhas com espessura e velocidade controladas. A este leito é realizada a ignição dos combustíveis na região superior e constante sucção dos gases na região inferior por um sistema de exaustão (Ball et. al., 1973).

#### 3.2 Processo de Sinterização

Segundo o Steel Statistical Yearbook, a produção de aço bruto em 2022 foi de 151,7 milhões de toneladas em setembro, refletindo em um aumento de 3,7% em relação a setembro 2021, mostrados na Figura 3. Para a fabricação do aço, o sínter representa 80% da carga ferrífera dos altos-fornos que é responsável por cerca de 65% da produção de aço no mundo. Por isso se justifica necessária tal importância para esse processo de produção de sínter por tamanho volume de alimentação dos altos-fornos (Ohno et. al., 2013), além de atrair melhorias de processos e investimentos tecnológicos a fim de otimizar e minimizar custos

garantindo qualidade e segurança no processo de sinterização com foco nas estratégias de competição no mercado.

Figura 3 - Produção mundial de aço bruto em milhões de toneladas 2022



Fonte: (worldsteel.org, 2022).

A sinterização do minério de ferro é um processo de aglomeração que ocorre por meio da fusão parcial de uma mistura composta por finos de minério de ferro (sinter feed), fundentes, coque ou carvão, sínter de retorno e água (MOURÃO, 2007). Esse processo permite que os finos adquiram a granulometria e resistência necessárias para serem utilizados como carga metálica nos altos-fornos (GONDIM e CAMPOS Jr., 2007). O resultado é um material poroso e resistente, conhecido como sínter (MACHADO et al., 2003; ARAÚJO, 1997).

Pode-se dividir o processo de produção do sínter em quatro diferentes etapas (Jannuzzi, 2008): preparo e dosagem das matérias primas, baseando na obtenção da qualidade química adequada do sínter a fim de garantir a qualidade especificada pelo alto-forno; a aglomeração a frio da mistura, produzindo micropelotas com distribuição granulométrica mais grosseira a fim assegurar a permeabilidade efetiva do leito.

A sinterização, onde o processo de aglomeração a quente ocorre, produz novas fases mineralógicas; e finalizando com o tratamento final do sínter, ocorrendo o seu resfriamento,

fragmentação, classificação granulométrica e análise das características físicas, químicas e metalúrgicas.

### 3.3 Etapas do Processo de Sinterização

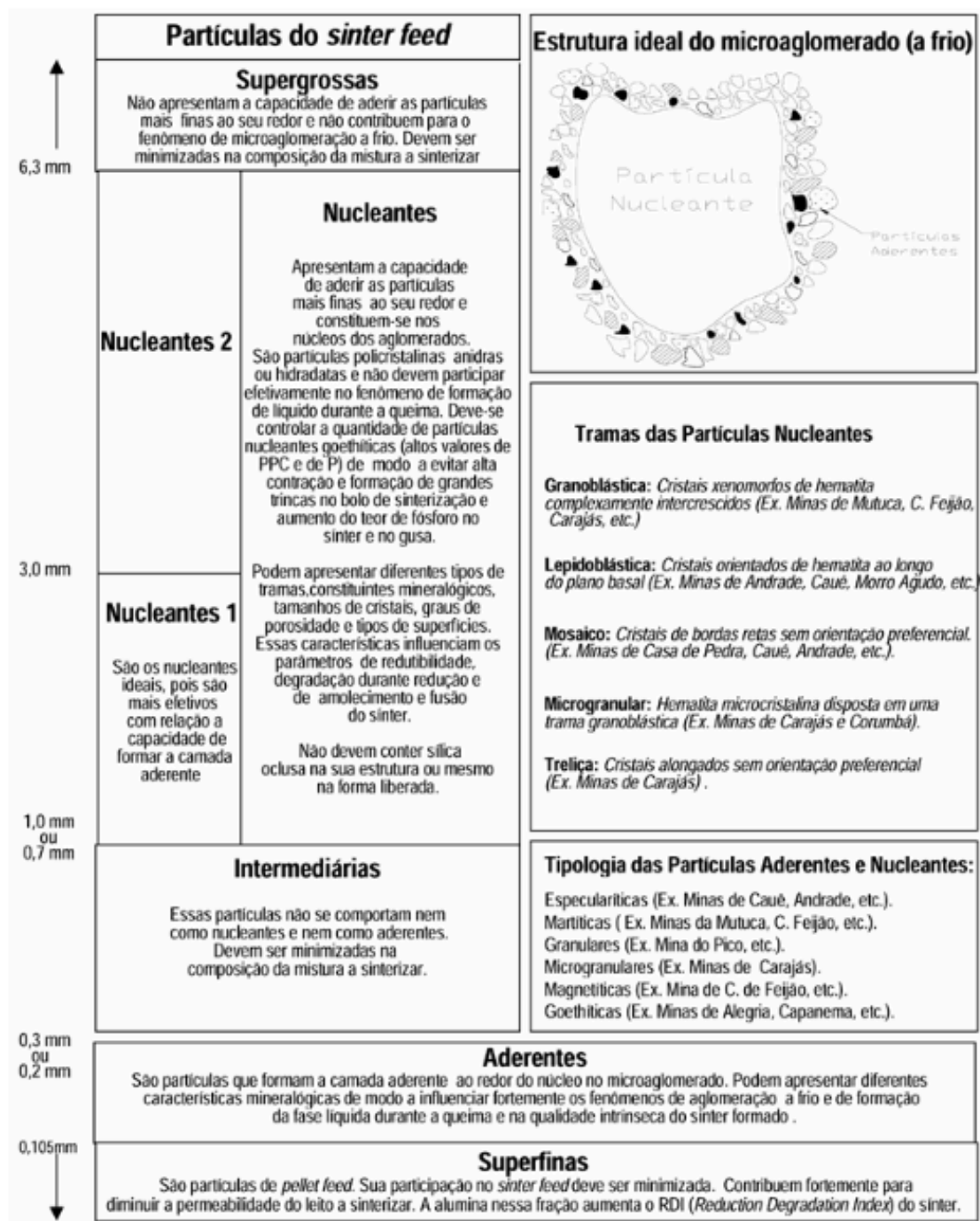
A sinterização é uma etapa importante no processo de fabricação de aço, pois permite a aglomeração do minério de ferro para uma forma consistente com um tamanho e composição química adequada para a produção de gusa.

A dosagem e adição das matérias-primas: fase inicial do processo, onde a dosagem de cada um dos insumos é feita respeitando-se uma série de premissas e com base no cálculo de carregamento: composição química desejada do sinter produto; basicidade adequada para sua utilização nos altos-fornos; balanço de massa da quantidade de finos de retorno gerados na sinterização; umidade visada para um bom processo de micro aglomeração, granulometria (partículas nucleantes e aderentes), balanço térmico, etc. (Ball et. al., 1973).

A etapa de microaglomeração a frio permite que as partículas sejam carregadas na máquina de sinterizar formando um leito homogêneo. Também evita a formação de canais e a segregação de componentes. Além disso, a etapa também reduz a quantidade de partículas finas, aumentando a permeabilidade do leito de sinterização. Outro benefício da microaglomeração é a contribuição para a melhoria da produção de sinter, pois permite que as partículas sejam carregadas de maneira homogênea e uniforme.

Isso garante que a homogeneidade da mistura seja mantida durante o processo de sinterização, o que contribui para a obtenção de um produto final de melhor qualidade. Na Figura 4, é apresentada uma ilustração da classificação adotada pela Nippon Steel que estabelece que as partículas do sinter feed com tamanho acima de 0,7mm são consideradas como nucleantes, abaixo de 0,7 mm e acima de 0,2 mm, como intermediárias e abaixo de 0,2mm, como aderentes.

Figura 4 - Classificação das partículas



Fonte: Microestrutura ideal do *sinter* de minério de ferro (modificada de Ishikawa et alli, 1982; Ishikawa et alli, 1983; Dawson, 1993; Pimenta e Seshadri, 2002 a, b).

A sinterização se dá com a sucção do ar pelos exaustores ocorrendo a transferência de calor das regiões superiores para as camadas inferiores, permitindo que o combustível presente nas camadas inferiores entre em combustão, transferindo a frente de queima até a

finalização da sinterização. A temperatura da frente de queima pode chegar a 1300° – 1375°C (Lu, 2015). A fusão incipiente causada pela queima do combustível e a formação de novas fases cristalinas são responsáveis pela aglomeração das matérias-primas.

Resfriamento e classificação do sinter produto: a etapa final é a classificação granulométrica do sinter produzido antecedido da cominuição por britadores e resfriamento do mesmo em esteiras rotativas. O bolo de sinter, após a classificação granulométrica, é enviado ao alto-forno, ou pode ocorrer o empilhamento deste mediante necessidade de processo e rotas.

Fernández- 7 Gonzáles et. al. (2017) evidenciam que as classificações da granulometria do sinter produto são: sinter abaixo de 5mm são reutilizados no processo de sinterização denominados de finos de retorno do sinter; entre 5 mm e 20 mm são utilizados como camada protetora do leito de sinterização para evitar contato direto da frente de queima com a esteira; sinter entre 20mm a 50mm são direcionados para abastecer a carga metálica nos altos-fornos.

### 3.4 Matérias-primas utilizadas no processo de sinterização

A mistura de minérios é a principal matéria-prima da sinterização, sendo responsável pela formação das partículas sinterizadas proporcionando as propriedades mecânicas e químicas necessárias ao produto final. O sinter produzido, por sua vez, é composto por uma mistura de minérios de ferro, carvão/antracito, fundentes, retorno interno, coprodutos.

Os fundentes são adicionados à mistura de minérios para ajudar na formação de uma matriz de escória de sinter. Também são usados para ajudar a reduzir o processo de solidificação das partículas, os mais comuns são a cal, calcário, a dolomita, ou magnesita e sua adição é sempre controlada a partir de um índice de basicidade (binária ou quaternária) objetivado (Ball et. al., 1973), que é informado pelo alto-forno que irá consumir o sinter gerado.

O antracito e o coque fino são os combustíveis sólidos utilizados para aumentar a temperatura da mistura de minérios a sinterizar. Os finos de retorno do processo de sinterização também completam essa base e são adicionados à mistura a sinterizar.

Os coprodutos ferrosos são adicionados à mistura a sinterizar a fim de minimizar custo da mistura final sem comprometer a qualidade do produto final e reduzindo também os passivos que são gerados no processo produtivo da indústria siderúrgica.

O Brasil tem a totalidade de suas grandes reservas de magnesita localizadas no nordeste do país, mais especificamente nos estados da Bahia e Ceará (Bodenlos, 1950, 1954).

É possível destacar que o minério magnesiano é uma fonte de magnésio utilizada na produção de sínter, sendo considerado um recurso estratégico para a indústria siderúrgica. A mina localizada em Brumado, Bahia, é uma das principais fontes de minério magnesiano do Brasil, juntamente com outras minas na região Nordeste do país (Vieira et al., 2018).

Segundo Oliveira et al. (2015), o minério magnesiano é utilizado na produção de sínter como uma alternativa para reduzir o consumo de combustível na indústria siderúrgica. Além disso, a utilização deste tipo de minério pode melhorar as propriedades do sínter, como a resistência mecânica e a taxa de redução, resultando em uma maior produtividade e qualidade do produto final.

Estudos realizados por Rocha et al. (2014) mostraram que a adição de minério magnesiano na mistura para sinterização pode melhorar a resistência mecânica do sínter e reduzir o consumo de combustível no processo. Além disso, os autores destacaram que a dolomita, um composto mineral na forma de um carbonato de magnésio, é comumente utilizada como fundente na sinterização para corrigir a composição química da mistura.

De acordo com Linhares (2019), a utilização do minério magnesiano na sinterização permite reduzir o consumo de coque na mistura de minérios, o que é altamente vantajoso em termos de economia e redução de impactos ambientais. Além disso, a presença do magnesiano na mistura também melhora as propriedades do sínter, aumentando sua resistência mecânica e diminuindo a formação de escória (Lu, 2015).

Outra vantagem da utilização do minério magnesiano é o aumento da produtividade na sinterização. Segundo Rivas Mercury e Marabini (2017), a adição de magnesiano na mistura de minérios favorece a redução da viscosidade da escória, o que possibilita a melhoria da permeabilidade do leito de sínter, resultando em maior produtividade.

### 3.5 Caracterização metalúrgica do sinter

#### 3.5.1 Propriedades a Frio

As propriedades desejadas para as matérias primas em relação aos procedimentos do processo que ocorrem a frio são resistência à abrasão, ao impacto e ao cisalhamento. A degradação das partículas em seu transporte através das correias transportadoras e em outras etapas de seu manuseio, como por exemplo durante a blendagem, misturamento e carregamento da máquina de sinter, deve ser mínima (MOURÃO, 2007).

A resistência à degradação a frio do sinter pode ser mensurada por meio dos ensaios: teste de tamboramento e teste de queda.

#### 3.5.2 Propriedades a Quente

As propriedades avaliadas do sinter nas etapas envolvendo altas temperaturas são: índice de degradação sob-redução, índice de redutibilidade e reatividade (MOURÃO, 2007).

- Índice de degradação sob redução: determina a geração de finos durante a redução da carga metálica. Acredita-se que sínteres com maior quantidade de hematita secundária romboédrica esqueletiforme estão sujeitos a maior RDI (DAWSON, 1993 apud CAMPOS et al., 2014). A presença de MgO no sinter traz um efeito positivo no RDI, pois aumentando-se a quantidade de MgO, maior quantidade de magnetita será gerada no sinter, e, sendo assim menos hematita. Como a magnetita sofre menos redução a baixas temperaturas, menor será o RDI (LOPES, 2012 apud CAMPOS et al., 2014).
- Índice de redutibilidade (IR): é a propriedade que um material tem de ser reagido pelas fases gasosas redutoras. A redutibilidade está relacionada à estrutura mineral, granulometria, mineralogia, trincas e a porosidade do sinter (CAMPOS et al., 2014; MOURÃO, 2007).

### 3.6 Microestruturas de formação no sinter

A ferrita de cálcio ( $\text{CaFe}_2\text{O}_4$ ) desempenha um papel fundamental na redutibilidade do sinter de minério de ferro, sendo essa uma característica de impacto para a eficiência do processo de redução no alto-forno. A redutibilidade refere-se à facilidade com que o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) pode ser convertido em ferro metálico (Fe) sob altas temperaturas e em uma atmosfera redutora, típicas do ambiente do alto-forno (Machado, 2021).

A presença de ferrita de cálcio no sinter oferece vantagens significativas para a redutibilidade. Primeiramente, a ferrita de cálcio é uma fase mineralógica formada durante o processo de sinterização, resultante da reação entre o óxido de cálcio (CaO) e o óxido de ferro. Essa fase apresenta uma estrutura porosa e uma configuração cristalina que facilita a difusão dos gases redutores, como monóxido de carbono (CO) e hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), durante a operação no alto-forno (Loo, 1998).

Além disso, a ferrita de cálcio tem uma temperatura de decomposição mais baixa em comparação com outras fases, como a wüstita (FeO), o que significa que ela se decompõe mais facilmente na presença de uma atmosfera redutora, liberando ferro para a redução final. Essa facilidade de decomposição, juntamente com sua porosidade, melhora a reatividade do sinter, permitindo uma redução mais rápida e eficiente do óxido de ferro (Machado, 2021; Loo, 1998).

A presença de hematita lamelar ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) no sinter exerce uma influência significativa sobre o índice de degradação sob redução (IDR), que é uma medida da resistência do sinter à fragmentação durante o processo de redução em um alto-forno. O IDR elevado é indesejável, pois indica que o sinter se desintegra mais facilmente, comprometendo a eficiência do processo de produção de ferro-gusa (Machado, 2021).

A hematita lamelar é uma forma de óxido de ferro caracterizada por sua estrutura em camadas, o que a torna relativamente mais frágil em comparação a outras formas, como a hematita maciça ou a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Durante a redução no alto-forno, onde a hematita é progressivamente reduzida a wüstita (FeO) e, posteriormente, a ferro metálico, ocorrem mudanças volumétricas e tensões internas que podem levar à fragmentação das partículas do sinter (Loo, 1998).

Devido à sua estrutura lamelar, a hematita apresenta maior degradação sob redução, principalmente nas fases iniciais, quando a conversão de hematita em magnetita e wüstita é acompanhada por uma expansão volumétrica. Essa expansão gera tensões internas, que

tornam o sinter mais suscetível à fragmentação em partículas menores. Isso contribui para um aumento no índice de degradação sob redução (IDR), afetando negativamente o processo produtivo. A fragmentação gera finos que podem obstruir o fluxo de gases no alto-forno, elevando a resistência ao fluxo, diminuindo a produtividade e aumentando o consumo de coque (Machado, 2021).

Assim, é essencial minimizar a presença de hematita lamelar no sinter ou melhorar a qualidade estrutural dessa fase, a fim de reduzir o IDR e aumentar a eficiência do processo de redução no alto-forno (Loo, 1998).

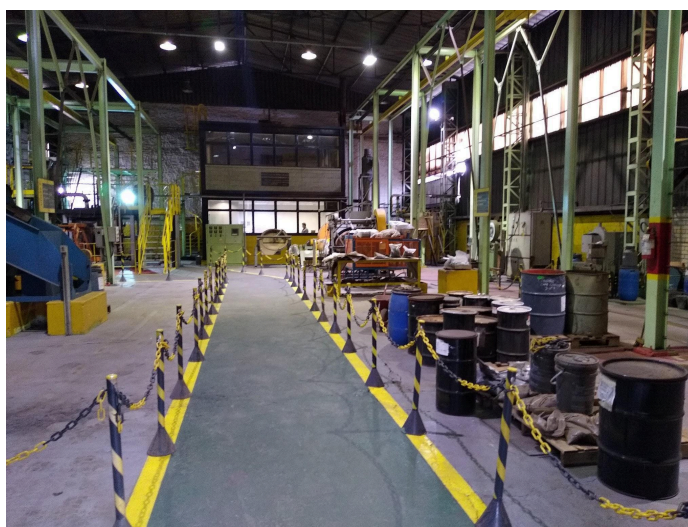
A hematita primária é uma forma de óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) que se forma diretamente por processos magmáticos, metamórficos ou sedimentares, sem sofrer alterações químicas significativas após sua formação inicial. Existem várias formas de hematita primária, que variam em textura, cor e estrutura, sendo sua composição e comportamento relevantes para a qualidade do sinter (Machado, 2021).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Plano de teste

Para a execução de qualquer projeto em escala piloto de sinterização é necessária a elaboração de um Plano de Teste ou Plano de Queimas. Nele devem estar contextualizadas as razões que fundamentam o projeto de pesquisa, os objetivos, matérias primas e passo a passo das etapas do teste, que mostra o fluxograma do projeto; quantos níveis de queima serão realizados, os parâmetros fixos e variáveis para as queimas, a definição da mistura a sinterizar, as condições simuladas, os critérios de aceitação dos níveis de queimas, um cronograma e a metodologia utilizada. Os ensaios foram realizados na Unidade Piloto, Gerdau Ouro Branco-MG mostradas nas Figuras 5 e na Figura 6.

Figura 5 - Unidade Piloto- Gerdau, Ouro Branco.



Fonte: Próprio autor

Figura 6 - Forno de Ignição

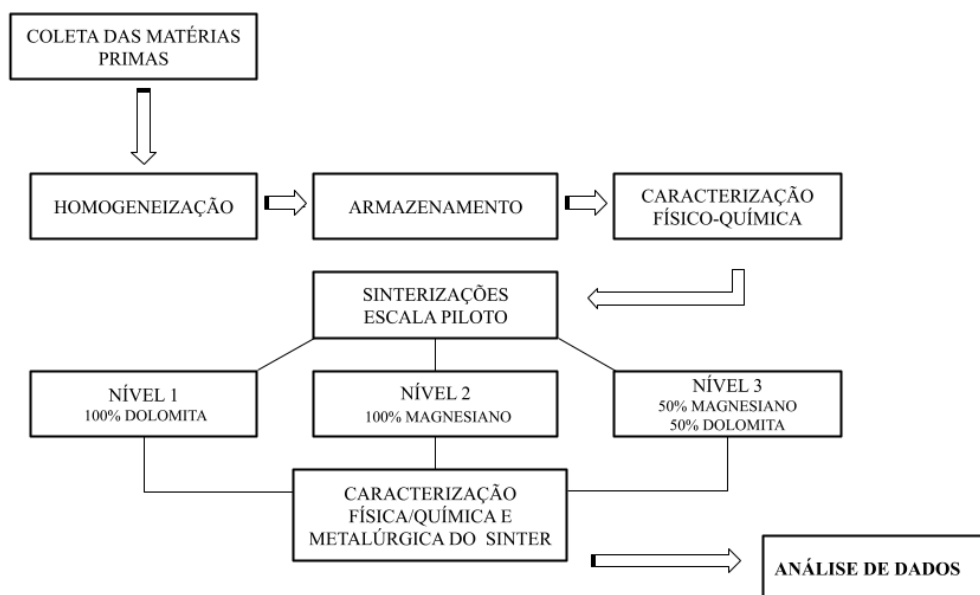


Fonte: Próprio autor

#### 4.2 Plano de Teste Piloto

O plano de teste, seguiu conforme o fluxograma mostrado na Figura 7. As matérias primas utilizadas para os testes de sinterização foram as mesmas utilizadas na produção de sinter em escala industrial, sendo coletadas nas balanças dosadoras da planta de sinterização.

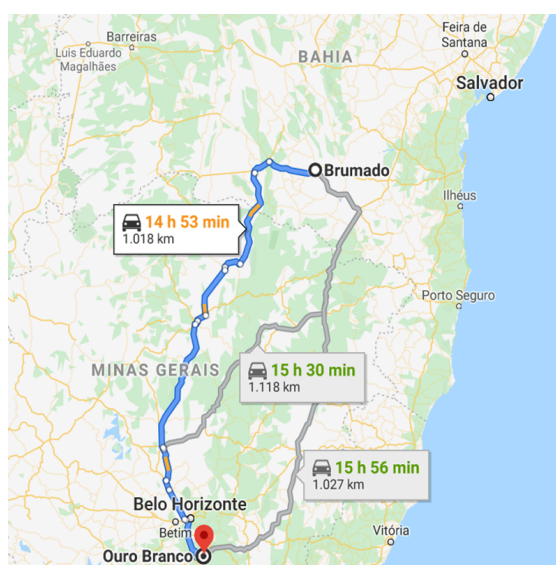
Figura 7 - Fluxograma das etapas do projeto.



Fonte: Próprio autor

O minério magnésiano, objetivo de teste do presente trabalho, é proveniente do fornecedor MgÓxidos, localizado em Brumado, Bahia, essa distância requer um planejamento logístico robusto, mostrado na Figura 8, no caso da escala de produção industrial, para sustentar uma produção constante de sínter sem afetar a qualidade e níveis de silo.

Figura 8 - Localização do fornecedor.



Fonte: Google maps

A coleta das matérias primas ocorreu seguindo os padrões de amostragem de maneira que o material coletado seja representativo perante o montante utilizado na escala industrial. Para os materiais coletados nas balanças dosadoras da unidade industrial, a coleta foi com o auxílio de uma pá, tomando-se incrementos nas laterais da correia transportadora e ao centro da mesma. O material foi colocado no interior de um recipiente (balde/tambor) e transportado até a Unidade piloto de sinterização com utilização da empilhadeira.

A quantidade de material coletado foi calculada de acordo com a capacidade da panela em que as queimas foram realizadas. Consideradas cinco queimas para a validação de um nível de teste, onde no mínimo a validação necessária por três queimas dentro dos limites de tolerâncias, tendo então uma margem de duas queimas que poderão ser descartadas para a validação do nível de queima.

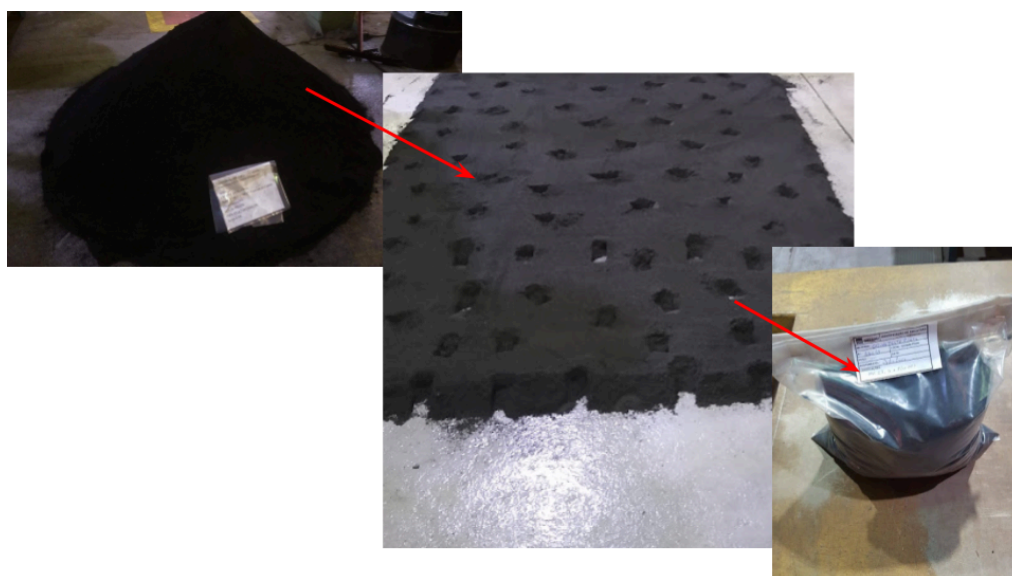
### 4.3 Homogeneização e amostragem das matérias primas

Para redução de erros e representatividade dos testes realizados, todas as matérias primas passaram por um procedimento de homogeneização de maneira a garantir que as qualidades dos materiais utilizados nas diversas queimas sejam uniformes.

O material foi despejado na lona de borracha formando um cone, então, com o auxílio de pás, foram coletados incrementos por todos os lados deste cone e o material novamente empilhado formando um novo cone. Este procedimento, denominado de homogeneização em lona, foi repetido por três vezes.

Em seguida, com o uso da enxada, o material foi disposto para formar um canteiro com altura de 10 cm. O canteiro foi dividido em duas partes e uma das partes sobrepostas à outra. Feito isso, foi espalhado novamente o material em forma de canteiro para proceder com a coleta de massa da qual foi retirada a amostra para análise, mostrado na Figura 9. Foi coletado aproximadamente 20 kg do material para quarteamento manual em bancada e composição das amostras que serão enviadas ao laboratório para análise química e física.

Figura 9 - Canteiro de amostras



Fonte: Próprio autor

#### 4.4 Definição das misturas a sinterizar

O cálculo para compor a mistura a sinterizar foi realizado considerando as qualidades químicas de cada uma das matérias primas utilizadas, devendo adequar aos parâmetros de restrição previamente definidos e ao convênio de qualidade do sinter com os altos-fornos.

Os parâmetros de restrição para os ensaios previstos foram:

- Teor de MgO: 1,40%.
- Basicidade Binária (CaO/ SiO<sub>2</sub>): 1,60.
- Base de Combustível: 3,40%.

Os teores de sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), manganês (MnT) e fósforo (P) não irão sofrer correções sendo os mesmos residuais das matérias primas utilizadas.

A mistura total a sinterizar foi composta da mistura parcial, da base de combustível e do sinter retorno. A base de combustível foi fixada em 3,40% da mistura total e será composta por finos de coque e antracito dosados em proporções igualitárias. O consumo de sinter retorno foi fixado em 29% da mistura total.

Na mistura parcial serão dosados a mistura de minérios de ferro, o calcário calcítico, o calcário dolomítico, a cal, minério magnesiano e os finos de sinter.

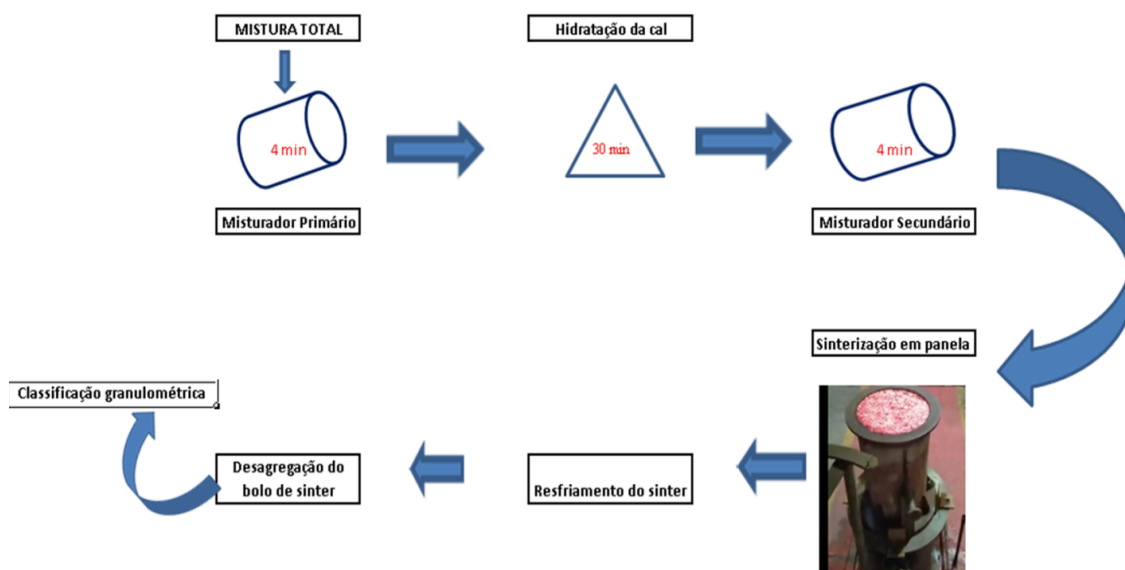
A dosagem do magnesiano foi realizada de maneira a avaliar a introdução deste material no processo de sinterização. O plano de testes previu a simulação do processo de sinterização iniciando com a alimentação do misturador e nodulizador tambor em três níveis de testes de sinterização piloto. Após a etapa de preparação de mistura, seguindo o cálculo de carga específico para cada condição, a mesma foi encaminhada para a queima na planta piloto de sinterização. Atendendo a rota operacional, conforme a Figura 10:

Nível 1: Condições de processo ou queima referência - 100% dolomita;

Nível 2: 50% de dolomita e 50% de magnesiano;

Nível 3: 100% de magnesiano;

Figura 10 - Fluxograma da rota de processo em escala piloto.



Fonte: Próprio autor.

O processo se deu seguindo as práticas e procedimentos vigentes de carregamento da panela e queima seguindo os seguintes parâmetros:

- Tempo de homogeneização nos misturadores: 4 min.
- Depressão de ignição: 900 mmH<sub>2</sub>O;
- Depressão de sinterização: 1.200 mmH<sub>2</sub>O;
- Depressão de resfriamento: 700 mmH<sub>2</sub>O;
- Tempo de ignição: 1 min.;
- Massa de falsa grelha: 4,50 kg;
- Temperatura final de resfriamento: 90° C;
- Umidade da mistura a sinterizar: 7,30%;

O percentual de finos de sinter retorno foi fixado em 12% na mistura parcial. O calcário calcítico foi dosado de maneira a atingir o valor especificado de basicidade binária para o sinter produto, assim como o calcário dolomítico e ou minério magnésiano foi dosado de maneira a atingir o valor de MgO especificado.

A mistura de minérios de ferro foi dosada na mistura parcial até completar o balanço de maneira que somada com as outras adições totalizou 100%.

A umidade objetivada para a mistura a sinterizar foi de 7,30%. Realizado o teste de umidade para todas as matérias-primas utilizada, tornando possível conhecer a umidade da mistura total através do balanço de massa. Desta forma, calculou-se a quantidade de água que deverá ser adicionada para atingir a especificação de umidade. A umidade foi corrigida até que se atinja o valor de 6,30% no misturador primário (betoneira) e a correção de mais um ponto percentual no misturador secundário.

#### 4.5 Condições de aceitação de queima

Fazem-se necessárias condições de validação dos ensaios a fim de se minimizar a influência de quaisquer erros imputados ao processo. Referir-se-á aos testes que atenderem aos critérios de validação como queimas válidas.

Para a validação dos testes foram necessárias três queimas válidas, das quais foi imprescindível que o teor de umidade da mistura, após a micro aglomeração, apresentou um desvio de  $\pm 0,20$  pontos percentuais dentre a média das três queimas. Além disso, a diferença de tempo de sinterização foi  $\leq 5\%$  entre as queimas, que o balanço de massa de sinter retorno esteja entre 95% a 105% e que a margem da média das três não seja superior a 5% e a mistura seca carregada possua uma diferença entre as queimas como sendo  $\leq 5\%$ . A Tabela 1 mostra os parâmetros aceitáveis.

Tabela 1- Parâmetros de validação das queimas.

| <b>PARÂMETROS ACEITÁVEIS</b> |            |
|------------------------------|------------|
| Teor de umidade              | ± 0,2%     |
| Balanço de Sinter Retorno    | 95% ~ 105% |
| Tempo de Sinterização        | ≤ 5%       |
| Mistura seca carregada       | ≤ 5%       |

#### 4.6 Testes pot grate

Após a estruturação das condições de processo e misturas a sinterizar como também as variáveis determinadas, deu-se início aos testes *pot grate*. Foram realizados três níveis de queimas com variação na dosagem da fonte de MgO. Os testes simularam a rota de sinterização com dois misturadores tipo tambor (betoneira).

##### 4.6.1 Análise de Umidade

Todas as matérias primas utilizadas nos testes foram submetidas à análise de umidade, realizada na unidade piloto de sinterização.

Uma massa superior a 600 g do material que se deseja analisar foi coletada e armazenada em um tabuleiro metálico com massa previamente conhecida. A amostra coletada, foi disposta de modo a propiciar uma secagem uniforme do material em análise. O tabuleiro mais a massa que em questão foram pesadas e da massa obtida subtraiu a massa do tabuleiro metálico para saber a massa inicial de material analisado.

Em posse da massa inicial, foram levados até a estufa, a qual permaneceu na temperatura de aproximadamente 105 °C. O tempo de residência da amostra na estufa foi de 90 minutos. Em seguida o tabuleiro contendo a amostra foi novamente pesado e da massa encontrada subtraindo a massa do tabuleiro para encontrar a massa final obtida. O resultado é percentual e calculado conforme a equação abaixo:

$$\text{Teor de Umidade} = \left[ \frac{(\text{massa inicial} - \text{massa final})}{(\text{massa inicial})} \right] \times 100$$

#### 4.6.2 Preparação das Misturas a Sinterizar

Todas as matérias primas sólidas foram pesadas na proporção, para atender a especificação do sinter produto e alimentadas no interior da betoneira (equipamento utilizado para simular o misturador primário). A massa de água necessária para atingir a umidade de 6,30% no misturador primário foi calculada considerando a umidade já presente em cada uma das matérias primas sólidas carregadas no misturador. O misturador (betoneira) foi então ligado para iniciar a homogeneização do material. O mesmo operou por 30 segundos para que na sequência ocorresse a adição de água à carga sólida com o auxílio do pulverizador de água. Após 4 minutos de residência no misturador, a mesma foi desligada. Uma amostra para verificação da umidade da mistura foi retirada. O material restante permaneceu no misturador para que ocorresse a hidratação da cal e a temperatura durante a hidratação foi monitorada até que atingisse um valor máximo.

A partir do resultado do teor de umidade obtido no misturador primário, procedeu-se com o cálculo de água a ser adicionada para que a mistura atinja o valor de 7,30% de umidade no misturador secundário de micro aglomeração. O material foi submetido ao processo do misturador secundário para a micro aglomeração. A massa de água necessária para aumentar em um ponto percentual a umidade da mistura carregada no misturador secundário já estava armazenada no pulverizador de água. O material foi carregado no misturador secundário e partiu para início a micro aglomeração, a qual se deu por 30 segundos com a umidade natural para que se iniciasse a adição de água objetivando 7,30% de umidade. O tempo total de residência da mistura no misturador secundário foi de 4 minutos. Ao término da microaglomeração foram coletadas amostras para verificação da umidade da mistura.

#### 4.6.3 Preparação da Painela de Sinterização

O primeiro passo foi a verificação do funcionamento do forno de ignição da mistura a sinterizar conforme o padrão operacional do laboratório para então dar início a preparação da painela para realização dos testes a quente. O forno foi mantido em baixa chama durante a preparação do material. A verificação do funcionamento do forno de ignição é importante,

pois, depois da panela já preparada, a mesma deve sofrer ignição para evitar perda de umidade no material.

Após a verificação do funcionamento do forno de ignição, a panela foi posicionada na chapa niveladora com auxílio da talha elétrica e a grelha metálica posicionada de maneira que fique bem nivelada no fundo da panela. A falsa grelha, sínter produto compreendido na faixa granulométrica de 10 a 25 mm, pesado conforme massa previamente definida e posicionado sob a grelha metálica formando uma camada uniforme com a função de proteger a grelha metálica da frente de combustão.

Foi posicionada sobre a panela uma tela de arame, o alongador metálico e uma segunda tela de arame para o abastecimento da panela com a mistura a sinterizar. As telas desempenham o papel de segregação das partículas abastecidas na panela. O carregamento da panela foi realizado com o auxílio de uma pá de bancada com bico quadrado, mostradas na Figura 11.

Figura 11 - Preparação da panela de mistura



fonte: Próprio autor

#### 4.6.4 Carregamento da Panela de Sinterização

Terminado o procedimento de micro aglomeração, a mistura foi carregada na panela previamente preparada para que não haja perda de umidade. A mistura micro aglomerada foi posicionada em uma caçamba ao lado da panela de sinterização e despejada cuidadosamente sobre as telas para abastecimento da panela.

Com foco na permeabilidade do leito de sinterização, foi realizado o enchimento da panela seja o mais uniforme possível para evitar perdas deste parâmetro do processo. Uma vez cheia, as telas de arame e o alongador metálico serão removidos, a camada superficial da panela deve ser nivelada e as bordas da panela limpas.

A panela carregada foi então posicionada sobre a balança com o auxílio da talha elétrica e a massa foi anotada em formulário específico.

#### 4.6.5 Ignição da Mistura a Sinterizar

Após concluída a etapa de carregamento da panela, a mesma foi posicionada com o auxílio da talha elétrica onde ocorreu a ignição da mistura. Foi checado a temperatura do forno de ignição no painel de controle, e na temperatura de 1100°C, o exaustor foi ligado e o forno de ignição posicionado sobre a panela, mostrado na Figura 12. A ignição ocorreu por 1 minuto e então o forno de ignição foi desligado e posicionado na plataforma refratária.

Figura 12 - Ignição da Mistura a Sinterizar



fonte: Próprio autor

Aguardou-se até que a sinterização completa da mistura ocorresse e também o seu resfriamento. Ao final do procedimento o alarme de indicação do término do resfriamento foi acionado e o exaustor foi desligado.

#### 4.6.6 Desagregação do Bolo de Sínter

Terminada a sinterização e o resfriamento do bolo de sínter, com o auxílio da talha elétrica, pesou-se a panela de sínter e anotou-se a massa obtida. A etapa seguinte foi a medição da contração do bolo de sínter. Com uma régua graduada, tomou-se medições da altura entre a camada superficial de sínter e a borda da panela em quatro pontos distintos, as alturas foram anotadas em formulário próprio.

Procedeu-se então com a desagregação do bolo de sínter, a qual tem a função de simular a quebra do bolo de sínter no britador e as solicitações mecânicas sofridas pelo sínter no seu transporte através das correias transportadoras até os altos-fornos.

A desagregação realizada utilizou o equipamento de teste de queda. A caixa foi posicionada no seu limite inferior e então a panela de sínter posicionada com o auxílio da talha elétrica próxima à mesma. A panela de sínter foi basculhada na caixa, a qual foi levada até o seu limite superior. Foi acionado o botão para abrir o fundo da caixa e o bolo de sínter sofreu a queda.

O sínter foi coletado com o auxílio da pá, enxada e vassoura para ser novamente carregado na caixa estando em seu limite inferior, içado até o limite superior para sofrer uma nova queda. O sínter sofreu nove quedas para a conclusão da simulação do processo industrial de desagregação e transporte do sínter.

#### 4.6.7 Classificação Granulométrica do Sínter

Após a produção do sínter em escala piloto procedeu-se com a classificação granulométrica do mesmo. Todo o material processado na desagregação do bolo de sínter foi coletado, armazenado em baldes e transportado até o peneirador automático. O sínter foi classificado e retido nas seguintes granulometrias:  $> 50$  mm,  $< 50$  mm e  $> 25$  mm,  $< 25$  mm e

> 10 mm, < 10 mm e > 5 mm, < 5 mm. As frações separadas foram armazenadas em baldes e pesadas para compor a análise granulométrica do sinter.

#### 4.6.8 Amostragem do Sinter

Foram compostas amostras do sinter de todas as queimas válidas para os três níveis com diferentes adições do minério magnésiano. O sinter produzido em cada queima válida foi novamente peneirado e separado nas frações descritas no item 4.6.7. Para cada teste válido, calculou-se as porcentagens que cada fração granulométrica representa na massa total de sinter produzida. As amostras foram compostas considerando as proporções de cada uma das frações granulométricas que compõem o sinter.

Cada uma das cinco frações granulométricas obtidas no segundo peneiramento foi homogeneizada para amostragem. Em uma lona de borracha previamente limpa, formou-se uma pilha cônica da fração onde foram coletadas as amostras, a pilha sofreu três tombos e então disposta para formar um canteiro com altura de aproximadamente 10 cm, mostrado na Figura 13. Deste canteiro, foram tomados incrementos para compor a amostra do sinter de acordo com a proporção que a fração em questão representa no sinter produzido e também levando em consideração a massa necessária para a amostra.

Figura 13 - Canteiro de homogeneização do sinter produto em escala piloto.



fonte: Próprio autor

Amostras com as seguintes massas foram compostas para as análises: 23 kg para teste de tamboramento, 20 kg para teste de queda, 10 kg para análise química, 2 kg para ensaios de IR e IDR e 500 g de cada uma das frações granulométricas para análise mineralógica do sínter. Após feita a homogeneização e amostragem das cinco frações granulométricas que compõem cada teste válido de acordo com as massas descritas para cada tipo de análise realizada, as amostras foram identificadas e enviadas para o laboratório, com exceção da amostra para teste de queda, o qual foi feito na própria unidade piloto, conforme a Figura 14.

Figura 14 - Fluxograma dos ensaios metalúrgicos do sínter



Fonte: Próprio autor

#### 4.6.9 Teste de Queda

O teste de queda (TQ) é utilizado para qualificar a resistência do sínter em relação ao impacto do transporte nas correias e quedas nas calhas manuseio e transporte). O TQ foi realizado conforme a Norma JIS M 8711 utilizando o mesmo equipamento no qual é feita a desagregação do bolo de sínter. A amostra para o teste foi composta de 20 kg do sínter produzido na faixa granulométrica de 10 mm a 50 mm. A caixa do teste de queda foi posicionada em seu limite inferior, com o seu fundo fechado, e a amostra de sínter para teste de queda é carregada na caixa. A caixa é então levada até o seu limite superior para ser acionado o botão que abre o fundo da caixa promovendo a queda do sínter. Toda a amostra

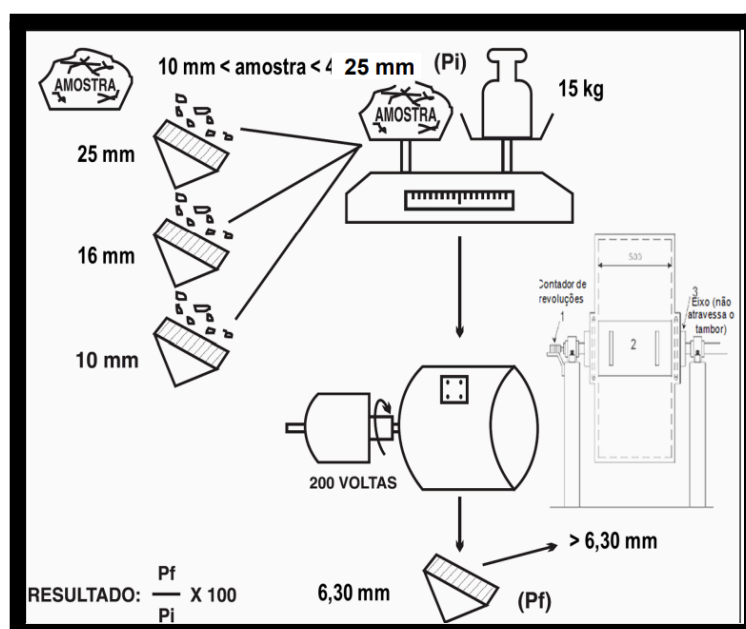
deve ser novamente carregada na caixa e o procedimento deve ser repetido até que se completem quatro quedas.

Terminadas as quedas, a amostra de sínter foi coletada e submetida a um novo peneiramento conforme descrito no item 4.6.7. As massas retidas nas peneiras de granulometria superior a 10 mm após o TQ foram pesadas e o resultado do teste foi a massa retida nas peneiras de granulometria superior à 10 mm dividido pela massa total ensaiada. O resultado foi expresso em porcentagem. O TQ é um indicador da resistência mecânica ao impacto do sínter produzido (REIS *et al.*, 2018).

#### 4.6.10 Teste de Tamboramento

O teste de tamboramento (TT) é utilizado para qualificar a resistência do sínter em relação à abrasão e também ao tamboramento. O TT foi realizado conforme a Norma JIS M 8712 no laboratório de matérias primas, conforme a Figura 15.

Figura 15 - Esquemática do teste de tamboreamento



Fonte: HONORATO 2005

A amostra para o TT é composta de 23 kg do sínter produzido na faixa granulométrica de 10 mm a 50 mm. A fração retida na peneira de 10 mm mede a resistência ao tamboramento e

a fração < 5 mm, mede a resistência à abrasão. O tambor contendo a amostra gira 200 voltas, à velocidade de 25 rpm. O material é então peneirado nas peneiras de 12,7 mm, 10 mm e 5 mm e separando-se a fração retida em 10mm e dividindo pela massa total ensaiada tem-se o resultado do tamboramento expresso em porcentagem. Já o passante da peneira de 5 mm dividido pela massa total ensaiada representa o índice de abrasão expresso em porcentagem (GONDIM e CAMPOS Jr., 2007).

#### 4.6.11 Índice de Redutibilidade

O ensaio de redutibilidade (RI) foi realizado conforme a Norma ISO 7215 no laboratório de matérias primas. Esse ensaio é uma medida relativa para avaliação da extensão na qual o oxigênio pode ser removido de minérios de ferro quando reduzidos, sob condições semelhantes àquelas que prevalecem na zona de redução do alto-forno. Neste teste, há uma redução isotérmica, na temperatura de 900 °C, de um leito de sinter, por meio de uma atmosfera contendo 30% de CO e 70% de N<sub>2</sub>. Uma amostra de 500g, com a granulometria entre 19 a 21 mm foi exposta a uma atmosfera redutora por 3 h. O grau de redução da amostra foi calculado a partir do percentual da perda de massa de oxigênio ao término do ensaio.

#### 4.6.12 Índice de Degradação sob Redução

O ensaio do Índice de Degradação sob Redução foi realizado conforme a Norma ISO 4696-2 no laboratório de matérias primas, Gerdau Ouro Branco-MG. A resistência a quente avalia a degradação do sinter quando exposto às condições redutoras do alto-forno. Apesar de o sinter ter menor resistência comparado ao minério e às pelotas, essa desvantagem pode ser compensada com um controle rigoroso desse parâmetro, reduzindo a faixa de variação. Minérios com alto índice de RDI (Reduction Degradation Index) não são adequados para o uso no alto-forno, pois tendem a se degradar mais facilmente sob essas condições.

O teste segue o seguinte procedimento: inicialmente, é preparada uma amostra de 500g de sinter, com granulometria entre 15,9 mm e 19,1 mm. A amostra é, então, inserida em um forno a 550°C e exposta a um gás redutor composto por 30% de CO e 70% de N<sub>2</sub> por 30 minutos. Após o resfriamento, a amostra é submetida a um processo de tamboramento com

900 voltas. Em seguida, realiza-se o peneiramento da amostra em uma peneira com abertura de 2,83mm, e, por fim, obtém-se o percentual final da análise (Machado, 2021).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise Química e Granulométrica das Matérias Primas

As características químicas das matérias-primas (% em massa) em escala piloto e granulométricas utilizadas nos ensaios estão representadas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente. Sendo a primeira relacionada à composição química e a segunda a análise granulométrica das matérias-primas.

A teor de MgO no minério magnésiano é mais do que o dobro quando comparado com a dolomita, mas por outro lado pode se notar que o percentual de CaO é insignificante. A dolomita também possui a participação de CaO maior do que o magnésiano, conforme a Tabela 2. Os resultados obtidos atenderam as especificações de matérias primas da sinterização.

Tabela 2 – Análise Química das matérias primas utilizadas.

| MATÉRIAS-PRIMAS           | ANÁLISE QUÍMICA (%) |       |                  |                                |       |      |       |                  |       |      |       |       |
|---------------------------|---------------------|-------|------------------|--------------------------------|-------|------|-------|------------------|-------|------|-------|-------|
|                           | FeT                 | CaO   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO   | MnT  | P     | TiO <sub>2</sub> | PPC   | FeO  | CF    | CZ    |
| Mistura de Minérios 2 /20 | 61,90               | 0,38  | 5,83             | 1,51                           | 0,32  | 0,60 | 0,042 | 0,148            | 2,60  | 0,17 |       | -     |
| Calcário 23               | 0,70                | 53,00 | 2,97             | 0,49                           | 0,46  | 0,03 | 0,037 | -                | 41,65 | -    | -     | -     |
| Dolomita 26               | 2,55                | 30,06 | 3,45             | 0,17                           | 20,29 | 0,32 | -     |                  | 42,15 |      |       |       |
| Minério Magnésiano 2020   | 1,56                | 0,35  | 2,92             | 0,55                           | 44,91 | 0,42 |       |                  | 48,46 |      |       |       |
| Degradado 11              | 57,06               | 8,76  | 5,70             | 1,36                           | 1,42  | 0,68 | 0,034 | 0,095            | -     | 5,14 |       |       |
| Cal virgem calcítica      | 0,00                | 80,29 | 1,32             | 0,32                           | 0,54  |      | 0,076 |                  |       |      |       |       |
| Coque fino                | 9,89                | 2,29  | 60,08            | 20,33                          | 1,27  | 0,12 | -     | -                | -     | -    | 87,48 | 9,75  |
| Antracito                 | 12,33               | 2,63  | 59,32            | 18,44                          | 1,28  | 0,18 | -     | -                | -     | -    | 86,98 | 10,27 |
| Minério Magnésiano RECL   | 1,31                | 0,33  | 3,02             | 0,59                           | 45,48 | 0,42 |       |                  |       |      |       |       |

A fim de atender o convênio da especificação da granulometria para sinterização, o Magnésiano foi submetido a uma classificação granulométrica e foi utilizado o Minério Magnésiano abaixo de 6,35 mm e maior do que 0,149 mm maximizando a concentração de MgO nas frações de reclassificação.

Tabela 3 – Análise Física das matérias primas utilizadas.

| Matérias primas         | Acumulados (%/mm) |       |              |        |
|-------------------------|-------------------|-------|--------------|--------|
|                         | >6,35             | >1,00 | >0,149 <1,00 | <0,149 |
| Mistura de Minérios     | 14,09             | 38,81 | 35,82        | 25,37  |
| Calcário                | 0,98              | 24,02 | 58,11        | 17,87  |
| Dolomita                | 0,12              | 46,32 | 9,57         | 44,10  |
| Minério Magnésiano      | 16,66             | 63,45 | 31,98        | 4,57   |
| Degradado               | 2,08              | 73,56 | 12,56        | 13,88  |
| Cal virgem calcítica    | 0,00              | 8,67  | 15,84        | 75,48  |
| Coque fino              | 0,61              | 41,53 | 40,31        | 18,17  |
| Antracito               | 0,34              | 33,56 | 57,37        | 9,07   |
| Minério Magnésiano RECL | 0,21              | 56,56 | 34,26        | 9,18   |

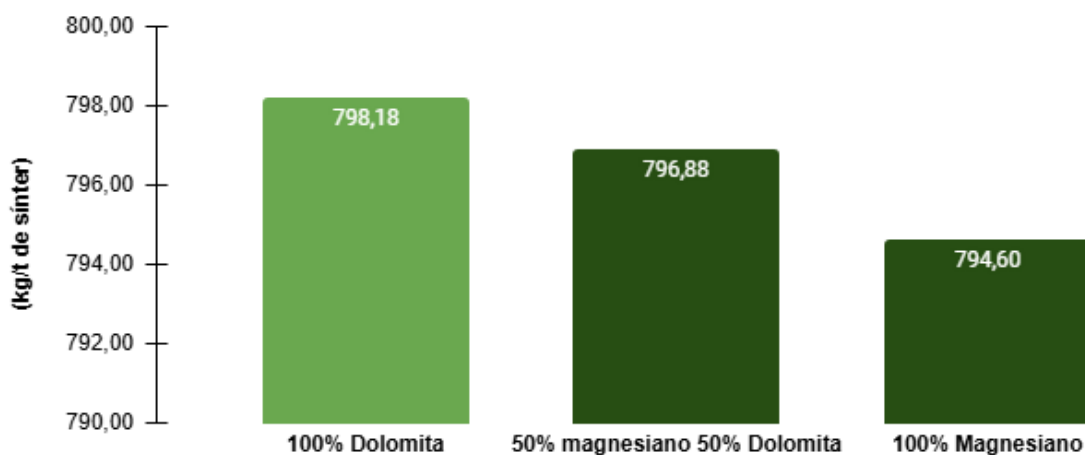
## 5.2 Consumos Específicos das Matérias-Primas

Realizando uma extrapolação dos dados obtidos com os testes em escala piloto e considerando os valores de capacidade produtiva de projeto para as máquinas de sínter, pode-se realizar um cálculo do consumo anual de matéria prima gastos para operar a máquina, considerando o índice de operação de cada máquina de sínter.

A capacidade produtiva de projeto para a máquina de sínter 1 é de 11.917 toneladas por dia, já a máquina de sínter 2 tem capacidade produtiva de 6.438 toneladas por dia (GONDIM e CAMPOS Jr., 2007; ARAÚJO, 2019). A capacidade anual de produção considerando um índice de operação de 90% pode ser estimada como sendo de 3.914.734,5 toneladas por ano para a MS1 e de 2.114.883 toneladas por ano para a MS2. Somando-se a capacidade produtiva anual de ambas as máquinas se estima que a produção seja aproximadamente 6 milhões de toneladas de sínter por ano.

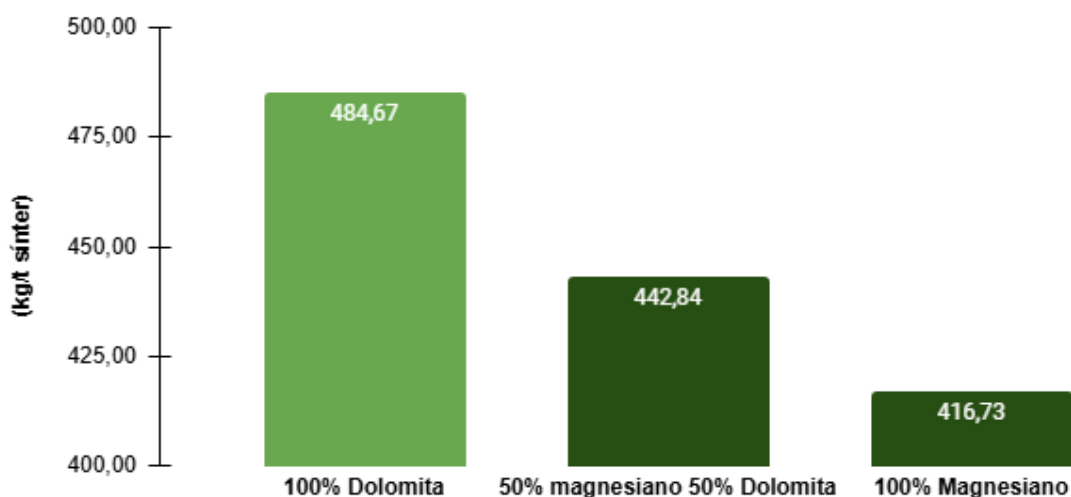
É possível verificar na Figura 16 do gráfico do consumo específico de minério que ocorreu uma redução quando utilizado a fonte alternativa de MgO representando um ganho e fica mais evidente quando substituído em cem por cento; levando em consideração que a mistura de minério tem um alto custo no processo de sinterização considera um resultado relevante.

Figura 16 - Consumo específico de Minério (kg/t sinter)



Com os testes fica notório que o uso do sinter retorno foi reduzido consideravelmente, essa redução de 3,58 kg por tonelada de sinter produzido no consumo de minério de ferro se dá pela relação direta com o aumento da resistência mecânica obtida no sinter produto com a adição do minério magnesiano, mostrado na Figura 17.

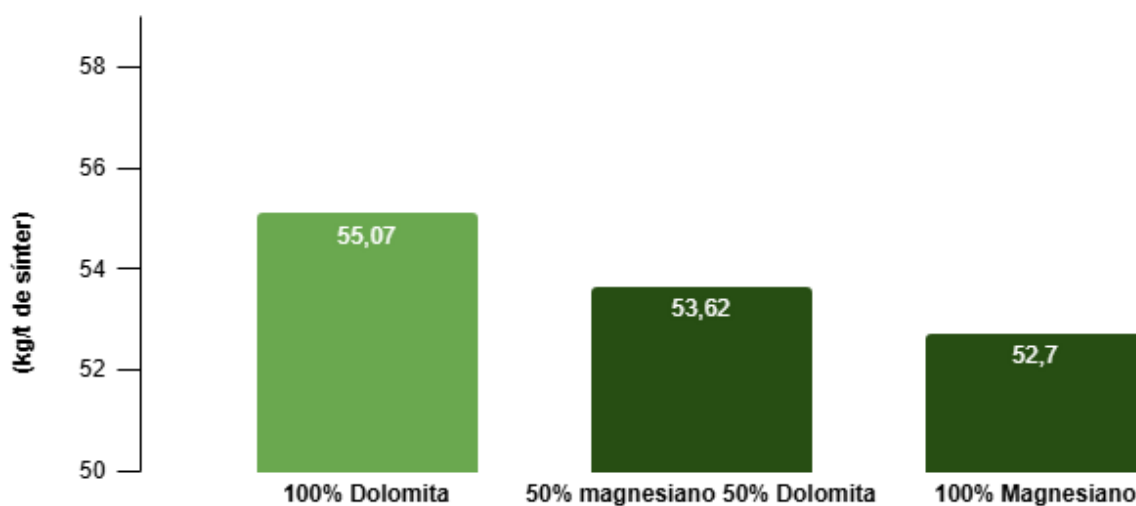
Figura 17 - Consumo específico de sinter retorno (kg/t sinter)



O consumo de combustível sólido mostrado na Figura 18 apresentou valores menores quando comparados com a queima de 100% dolomita e seguem uma mesma tendência ao nível de substituição em cem por cento da fonte alternativa de MgO, visto que gasto nas

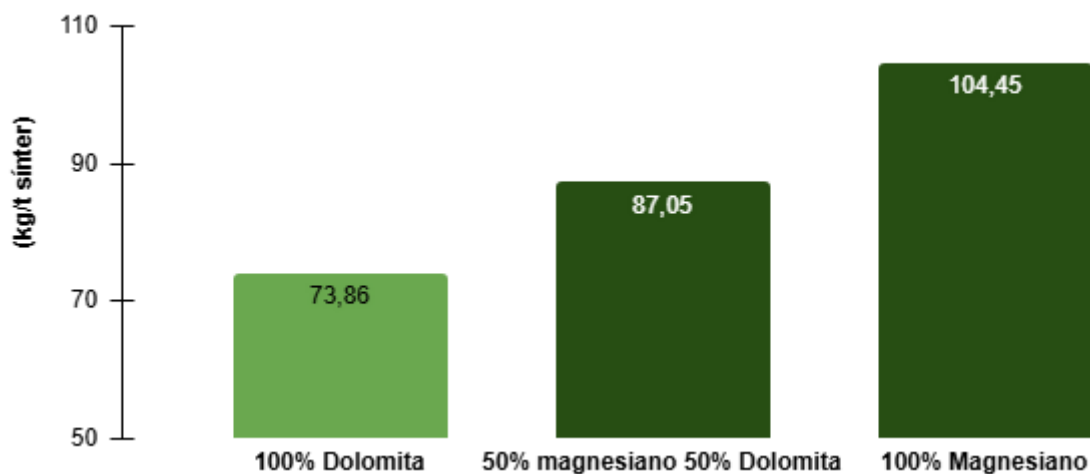
sinterizações com combustível é relevante, pois reflete diretamente no custo do sinter no presente trabalho em escala piloto, quando extrapolar para escala industrial representará uma economia competitiva para o negócio.

Figura 18 - Consumo Específico de Combustível (kg/t sinter)



O consumo de calcário elevou quando usado o minério magnesiano como fonte de MgO, visto na Figura 19. Isso se explica quando observado o teor de CaO na dolomita versus minério Magnesiano como mostrado na Tabela 2, onde a dolomita tem 30,6% no teor de CaO versus o Magnesiano que tem apenas 0,35%. Assim, percebe-se que a presença do CaO na dolomita diminui o consumo da fonte de CaO fornecida pelo calcário.

Figura 19 - Consumo Específico de Calcário



Os demais consumos de matérias primas podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 - Consumo específico das matérias primas.

| TESTES                         | CONSUMO ESPECÍFICO DOS MATERIAIS (kg/t) |               |             |                    |              |               |              |                |
|--------------------------------|---|---------------|-------------|--------------------|--------------|---------------|--------------|----------------|
|                                | Minério                                 | Calcário      | Dolomita    | Minério magnesiano | Cal          | Degradado     | Combustíveis | Sínter Retorno |
| 100% Dolomita                  | 798,18                                  | 73,86         | 58,63       | 0,00               | 32,88        | 131,36        | 55,07        | 484,67         |
| <b>100% Magnesiano</b>         | <b>794,60</b>                           | <b>104,45</b> | <b>0,00</b> | <b>20,52</b>       | <b>32,49</b> | <b>129,79</b> | <b>52,70</b> | <b>416,73</b>  |
| 50% magnesiano<br>50% Dolomita | 796,88                                  | 87,05         | 24,29       | 11,20              | 32,49        | 129,79        | 53,62        | 442,84         |

O rendimento da mistura total (R.M.T) está ligado inversamente com a quantidade de sínter retorno (fração menor que 5mm), que são gerados no peneiramento do sínter produzido. Com os dados apontados na Tabela 5 é possível observar que, quando usado 100% magnesiano, temos um R.M.T de 2,59 pontos percentuais acima, quando comparado com o rendimento do teste com 100% dolomita, confirmando a relação direta com o consumo do

sínter retorno mostrado na Tabela 4 ou seja, quanto maior o consumo do sínter retorno menor será o rendimento da mistura total e consequentemente baixa produtividade. O rendimento da mistura parcial (RMP) também seguiu esse comportamento, apresentando uma melhora de 1,1%.

Tabela 5 - Parâmetros do processo de sinterização piloto.

| TESTES                      | PARÂMETROS E INDICADORES DO PROCESSO |                |              |              |                  |                 |
|-----------------------------|--------------------------------------|----------------|--------------|--------------|------------------|-----------------|
|                             | Produtividade                        | Veloc. Sínter. | R.M.T        | R.M.P        | Temp. Gases (°C) | Teor de Umidade |
| 100% Dolomita               | 24,67                                | 14,22          | 61,74        | 91,33        | 254              | 7,32            |
| <b>100% Magnesiano</b>      | <b>25,64</b>                         | <b>14,22</b>   | <b>64,33</b> | <b>92,43</b> | <b>256</b>       | <b>7,32</b>     |
| 50% Magnesiano 50% Dolomita | 24,80                                | 13,82          | 63,41        | 92,43        | 262              | 7,41            |

### 5.3 Análises Metalúrgicas do Sínter

Nos ensaios metalúrgicos realizados, mostrados na Tabela 6, é possível comparar os três níveis, nos seguintes ensaios: TT>6,35 (Teste de Tambor), Teste de Queda (TQ), Índice de redutibilidade (IR), e o Índice de Degradação por Redução (IDR).

Tabela 6 - Testes Metalúrgicos no Sínter

| TESTES                         | TT>6,35      | TQ           | IR           | IDR          |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Nível 1- 100% Dolomita         | 63,48        | 84,85        | 70,81        | 24,43        |
| <b>Nível 2-100% Magnesiano</b> | <b>67,25</b> | <b>86,69</b> | <b>58,57</b> | <b>27,01</b> |
| Nível 3-50% Magnesiano         | 65,30        | 85,80        | 58,65        | 25,02        |

Quando observado o Teste de Tambor e Teste de Queda para os três níveis, o comportamento apresentado foi melhorado com a adição do minério magnesiano quando comparado com o nível da adição de 100% da dolomita.

Para os testes a quente, no IR (Índice de Redutibilidade) esse comportamento já se distingue para o nível com 100% dolomita, que apresenta um pior resultado e fica mais evidente quando se observado o resultado do IDR com os demais níveis mostrados na Tabela 5.3, aparentemente o magnesiano se mostrou desfavorável para o IR e o IDR. O motivo para tal comportamento pode estar associado a hematita primária do tipo lamelar (fase apresentado na mineralogia) visto que a capacidade de redução das fases minerais presentes no sinter segue a seguinte ordem decrescente: hematita > ferrita de cálcio > magnetita > olivinas ((Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>).

#### 5.4 Análise Mineralógica do Sinter.

A avaliação das fases presentes foi realizada por embutimento a frio com o microscópio Leica - Luz Refletida e microscópios eletrônicos de varredura, foi realizado a mineralogia do sinter produzido dos níveis 2 e 3 respectivamente, 100% minério magnesiano e 50% dolomita 50% minério magnesiano.

Para analisar as fases (provenientes dos sinteres produzidos nos testes), tem se com os seguintes significados: hematita primária (HP), hematita secundária (HS), magnetita (MA), ferrito de cálcio (FC), fase silicatada (FS), quartzo (QZ), outros (OT) e poros (PO) no sinter, mostrados na figura 20. A hematita primária e a ferrita de cálcio estão em maiores proporções no sinter com 100% fonte de MgO do minério magnesiano.

Figura 20 - Gráfico comparativo: fases globais presentes

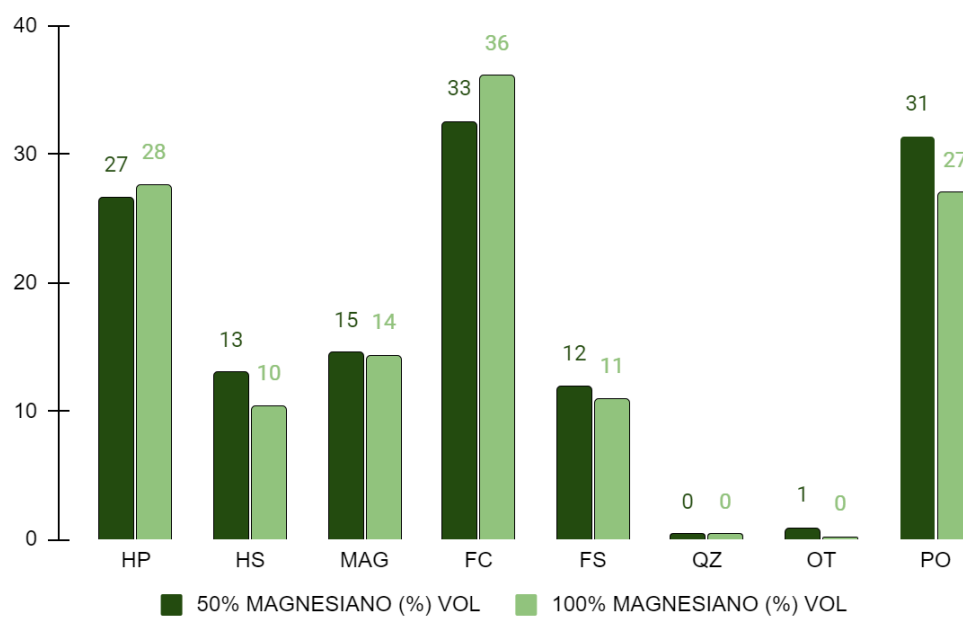
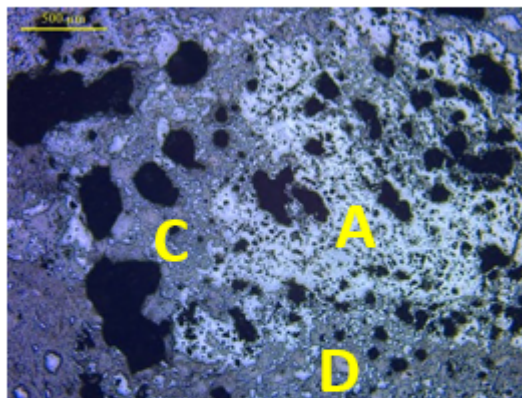


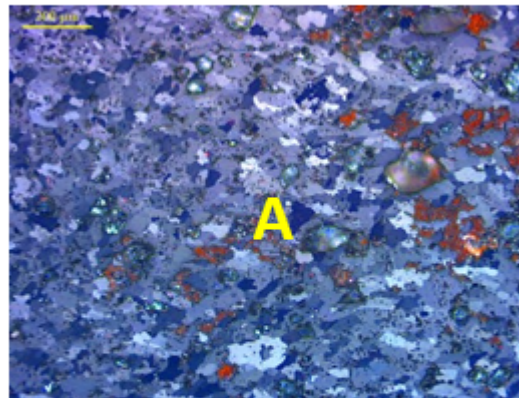
Figura 21 - Principais tipos de microestruturas existentes no sinter 50% Magnesiano

Foto (a) - Fração: 25,0 mm Au: 100X



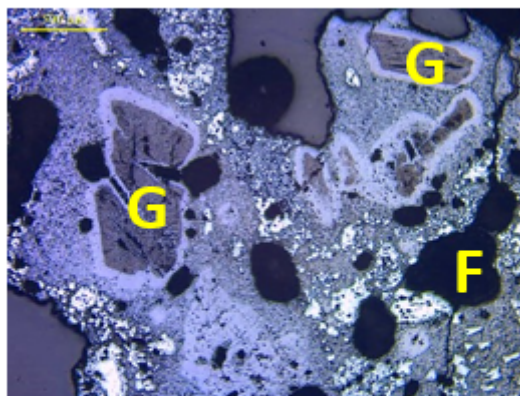
A - Grãos de hematita lamelar ao centro (nucleante) em massa de ferrito de cálcio e pequenos núcleos de magnetita (D)

Foto (b) - Fração: 19,0mm Au: 200X



A - Cristais de hematita lamelar (primária) de granulação fina ( 0,010 a 0,040 mm)

Foto (c) - Fração: 10,0mm Au: 50X



C - Grãos de provavelmente dolomita (não reagido) (G) (fração aderente) unidos por ferrito de cálcio e fase silicatada  
F - Poros da reação

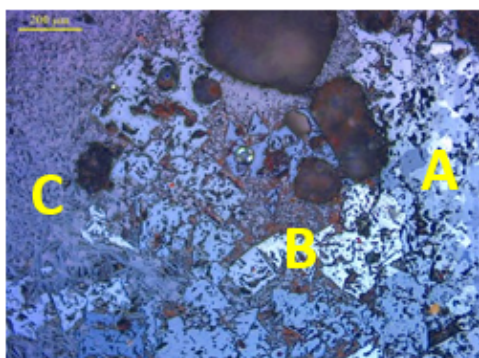
A Redutibilidade é influenciada pela existência da ferrita de cálcio e em todas as frações, prevalece o ferrito de cálcio do tipo acicular em relação ao colunar, mostrados na Figura 21 (foto (a) e Foto (b) e neste nível 50% de substituição da fonte de MgO e o de 100% magnesiano, apresentou desempenho inferior quanto ao IR comparando com a taxa de substituição em 100% em Dolomita. A hematita é do tipo lamelar policristalina em matriz de

ferritos de cálcio acicular (foto (b)). A magnetita aparece na forma de pequenos núcleos disseminados na matriz de ferrito de cálcio (foto (a), no ponto C).

Devido à sua estrutura lamelar, a hematita, no ponto A o minério residual da fração nucleante, tem trama granoblástica, é policristalino com cristais de granulação fina (0,010 a 0,040 mm), apresenta maior tendência à degradação sob redução, particularmente nas fases iniciais do processo, onde a conversão de hematita em magnetita e wustita é acompanhada por uma expansão volumétrica significativa. Essa expansão provoca tensões internas que, em minerais com estrutura lamelar, tornam o sinter mais suscetível à fragmentação em partículas menores. Como resultado, há um aumento no índice de degradação sob redução (IDR), o que é desfavorável no processo de produção de ferro-gusa, pois a fragmentação excessiva pode levar à formação de finos, prejudicando o fluxo de gases e a eficiência do alto-forno (Loo, 1998). A hematita secundária é predominante romboédrica e as esqueletiformes são raras, mostradas na Figura 22.

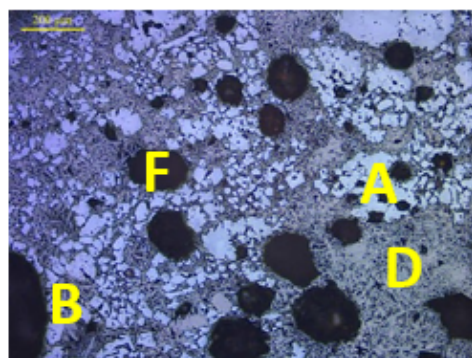
Figura 22 - Principais tipos de microestruturas existentes no sinter 100% Magnésiano.

Foto (a) - Fração: 25,0 mm Au: 100X



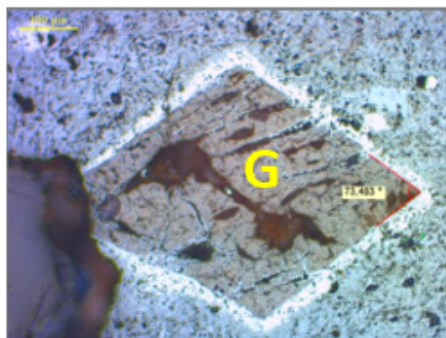
A - Partícula policristalina (nucleo não fundido) da fração nucleante (hematita lamelar)  
 B - Cristais de hematita secundária romboédricas  
 C - Ferrito de cálcio acicular

Foto (b) - Fração: 19,0mm Au: 200X



A/B - Hematita primária e secundária disseminadas na matriz de ferritos de cálcio aciculares  
 D - Pequenos núcleos de magnetita  
 F - Poros da reação

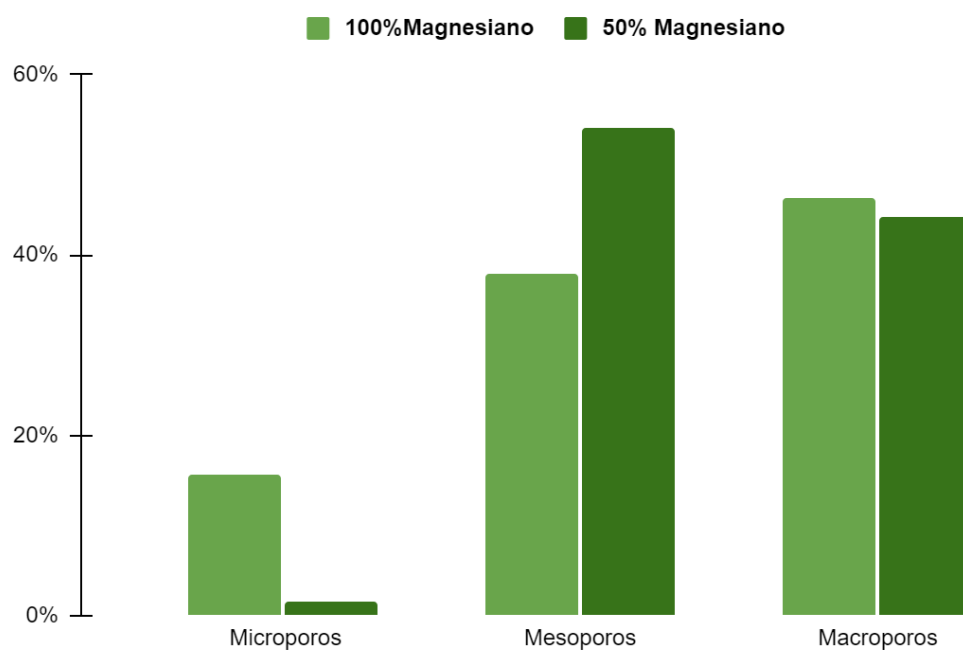
Foto (c) - Fração: 10,0mm Au: 50X



G - Grão não reagido de óxido de magnésio (ângulo de cristalização preservado)

O tamanho dos poros observados na Figura 23 do sínter, tem uma influência significativa na resistência a frio do material (IDR, TT). Macroporos no sínter tendem a reduzir sua resistência a frio, pois aumentam a fragilidade da estrutura, tornando-a mais suscetível à fratura sob pressão mecânica que ocorre no transporte antes do carregamento no alto-forno. Essa relação é especialmente crítica, pois um sínter com baixa resistência a frio pode gerar uma quantidade excessiva de finos durante o manuseio, o que não só afeta a eficiência operacional, mas também pode comprometer o desempenho do alto-forno (Loo, 1998).

Figura 23 - Quantificação do tamanho dos poros



## 6. CONCLUSÕES:

Nos testes em escala piloto, com a substituição total da fonte de MgO, a adição de 20 kg do minério magnesiano para a produção de 1 tonelada de sinter, observou-se a elevação de 2,6 pontos percentuais no índice de degradação sob redução; apresentou a redução de 2,3 kg/t de sinter produzido no consumo de combustível, redução de 67,94 kg/t de sinter na geração de sinter retorno, confirmando a elevação na resistência mecânica do sinter. O rendimento da mistura total apresentou uma elevação de 2,59 pontos percentuais, comparado com o 100% dolomita.

Os resultados mostraram melhora na resistência mecânica do sinter, um ganho de 3,77 pontos percentuais na substituição total da fonte de MgO visto no resultado do Teste de tambor e 1,84 pontos percentuais no teste de Queda para esta mesma taxa de substituição. O Rendimento da mistura Total foi melhorado na taxa de substituição total para uma mesma velocidade de sinterização em 2,79 pontos percentuais e aumento de produtividade seguiu a mesma tendência, logo:

- Os testes confirmaram que o minério magnesiano pode ser utilizado como fonte alternativa de MgO na produção de sinter sem afetar a qualidade química, metalúrgica e física do sinter produto.
- A distância da fonte da matéria prima é um fator limitante pois requer atenção quanto ao transporte que é do tipo rodoviário e pela distância o valor do frete desta fonte alternativa de MgO deverá ser avaliado.

Os objetivos do trabalho foram alcançados sem impactos significativos que prejudique a qualidade do sinter. Portanto, a substituição da fonte de MgO da dolomita para o minério magnesiano se mostrou tecnicamente viável.

## 7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Testar proporções de substituição da fonte alternativa, avaliando as correlações das dosagens com a performance de processo do sinter produzido, podendo estabelecer um modelo matemático para diferentes taxas de substituições.
  
- Explorar testes mineralógicos do sinter, a fim de checar estruturas favoráveis ao aumento de resistência mecânica, e estruturas presentes que possam esclarecer a influência nos índice de redutibilidade e o índice de redução da degradação.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- BALL, Derrick Frank. Agglomeration of iron ores. Estados Unidos: American Elsevier Pub. Co, 1973.
- 2- BODENLOS, A. A. (1950). Depósitos de magnesita do Brasil. *Economic Geology*, 45(4), 401-415.
- 3- BODENLOS, A. A. (1954). Depósitos de magnesita do distrito de Brumado, Bahia, Brasil. *Economic Geology*, 49(5), 431-440.
- 4- BUZATU, M., & BUZGAR, N. (2013). Características mineralógicas e geoquímicas da magnesita do condado de Sibiu, Romênia. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 8(3), 107-116.
- 5- COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. Revisão técnica de André Luiz V. da Costa e Silva. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.
- 6- HSIEH, L., & WHITEMAN, J. A. (1993). Effect of raw materials composition on the mineral phases in lime-fluxed iron ore sinter. *ISIJ International*, v. 33, n.4, p. 462-473.
- 7- IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. Informações e análises da economia mineral brasileira. Disponível em: <https://ibram.org.br/publicacoes/?txtSearch=&checkbox-section%5B%5D=1236>. Acesso em 13 nov. 2022.
- 8- ISHIKAWA, Y. et alii. Improvement of sinter quality based on mineralogical properties of ores. *Ironmaking Conference Proceedings, AIME v.42*, p. 17-29, 1983.
- 9- ISHIKAWA, Y. et alii. Recent progress in the sintering technology - high reducibility and improvement of fuel consumption. *Ironmaking Conference Proceedings, AIME*, v. 41, p. 80-89, 1982.
- 10- LINHARES, Fabiano Maia. Utilização de maiores percentuais de pellet feed na etapa de aglomeração a frio da sinterização de minério de ferro a partir da adição de aglomerantes [recurso eletrônico] / Fabiano Maia Linhares. - 2019, p.

- 11- LU, Liming. Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015.
- 12- RIVAS MERCURY, J. M., & MARABINI, A. M. (2017). Revisitando a cinética de dissolução da magnesita em soluções de ácido acético. *Chemical Engineering Science*, 163, 216-222.
- 13- ROSIÈRE, C. A. et alii. Classificação genética de minérios de ferro - problemas e vícios - Proposta de uma classificação tipológica para indústria. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, 28, 1997. Vitória. Anais ... São Paulo: ABM, 1997, p. 295-302.
- 14- VIEIRA, C. B., ROSIÈRE, C. A., PENA, Q. E., SESHADRI, V., ASSIS, P. A. Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras: uma análise crítica. *REM - Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, v. 56, n.2, p. 97-102, abril
- 15- Publicações - IBRAM. Informações e análises da economia mineral brasileira. Disponível em <https://ibram.org.br/publicacoes/?txtSearch=&checkbox-section%5B%5D=1236>. Acesso em 13 nov. 2022.
- 16- ROSIÈRE, C.A. et alii. Classificação genética de minérios de ferro - problemas e vícios - Proposta de uma classificação tipológica para indústria. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, 28, 1997. Vitória. Anais ... São Paulo: ABM, 1997, p. 295-302.
- 17- ISHIKAWA, Y. et alii. Improvement of sinter quality based on mineralogical properties of ores. *Ironmaking Conference Proceedings, AIME v.42*, p. 17-29, 1983.
- 18- VIEIRA, C. B., ROSIÈRE, C. A., PENA, Q. E., SESHADRI, V., ASSIS, P. A. Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras: uma análise crítica. *REM - Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, v. 56, n.2, p. 97-102, abril-jun. 2003.KP
- 19- RIBEIRO, R. E. G. et al. CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO DE CREPITAÇÃO DE MINÉRIOS GRANULADOS DE FERRO AMOSTRADOS NOS SILOS DE ALIMENTAÇÃO, p. 6628-6637. In: 69º Congresso Anual da ABM - Internacional, São Paulo - Brasil, 2014. ISSN: 2594-5327, DOI 10.5151/1516-392X-24421
- 20- MOURÃO, M. B. Introdução à Siderurgia. São Paulo: ABM, 2007. 428 p

- 21- GONDIM, E. P. e CAMPOS Jr., F.L.C. Manual de treinamento processo de sinterização. Ouro Branco: Gerdau Açominas, 2007. 101p.
- 22- LOPES, A. A., et al. ESTUDOS DA INFLUÊNCIA DA BASICIDADE E DO TEOR DE FeO DO SÍNTER NA ZONA DE AMOLECIMENTO E FUSÃO DO ALTO FORNO, p. 265-271. In: 46º Seminário de Redução/ 17º Minério de Ferro/ 4º Aglomeração, Rio de Janeiro, 2016. ISSN: 2594-357X, DOI 10.5151/2594-357X-27780 REIS, R. S., et al. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE DIFERENTES MINÉRIOS DE FERRO NO PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO, p. 69-79. In: 6º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minérios, São Paulo, 2018. ISSN: 2594-357X, DOI 10.5151/2594-357X-31387.
- 23- CAMPOS, Danielle Gonçalves; FONSECA, Gabrielli Machado Otero; CORREIA, Helder Machado; OLIVEIRA, Reinaldo Carvalho de. Instalação de forno para ensaios de redutibilidade (RI) e desintegração após redução à baixa temperatura (RDI). In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 44.SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 15.SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGLOMERAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, 2., 2014, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2014.
- 24- LOO, C. E. Alguns avanços na compreensão da ciência da sinterização de minério de ferro. In: ICSTI - Anais da Conferência sobre Siderurgia, 1998. p. 1299-1316.
- 25- AZEVEDO, Railson Nogueira de et al. Correlação entre Volume de Escória e Parâmetros de Qualidade do Sinter Produto. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 1, n. 4, p. 56-61, 2013.
- 26- HONORATO, E. P. Adequação granulométrica das matérias primas e do sistema de segregação contínua (I.S.F), para melhorias na produtividade e qualidade do sinter para os Altos-Fornos. 154 f. 2005. Dissertação (Mestrado) – UFMG/ Belo Horizonte, 2005.
- 27- MACHADO, Fernanda Borba. Utilização da escória de LD e carepa como insumos no processo de sinterização. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) – Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Campus Ouro Branco. Orientador: Prof. Dr. Guilherme Liziero Ruggio da Silva.

28- Loo, C. E. (1998). Some progress in understanding the science of iron ore sintering. In ICSTI - Ironmaking conference proceedings (pp. 1299-1316).

29- SILVA, Thiago Pinto; GANDRA, Beatriz Fausta; COSTA, Wilhan Nunes da. Efeito da magnesita no processo de sinterização. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGLOMERAÇÃO DE MINÉRIOS, 5., 2017, São Paulo. Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração, vol. 47, n. 3, 2017.