

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

VICENTE DE SOUSA

**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE UM SÍNTER DE FINOS DE
MINÉRIO DE FERRO COM BASE MAGNETÍTICA UTILIZANDO ROTA
DE PRODUÇÃO BASEADA EM CARVÃO VEGETAL VERSUS
COQUE DE PETRÓLEO BUSCANDO META DE BASICIDADE
PRIMÁRIA DE 1,4**

VOLTA REDONDA

2022

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

VICENTE DE SOUSA

**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE UM SÍNTER DE FINOS DE
MINÉRIO DE FERRO COM BASE MAGNETÍTICA UTILIZANDO ROTA
DE PRODUÇÃO BASEADA EM CARVÃO VEGETAL VERSUS
COQUE DE PETRÓLEO BUSCANDO META DE BASICIDADE
PRIMÁRIA DE 1,4**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, na área de concentração de processamento e caracterização de materiais minerais e linha de pesquisa em materiais metálicos.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe.

VOLTA REDONDA

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tação Wagner - CRB 7/RJ 4316

S725s Sousa, Vicente de

Síntese e caracterização de um sinter de minério de ferro com base magnetítica utilizando rota de produção baseada em carvão vegetal versus coque de petróleo buscando meta de basicidade primária de 1,4. / Vicente de Sousa. - Volta Redonda: UniFOA, 2023. 121 p.: Il

Orientador (a): Prof^o Dr. Alexandre Habibe

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2023

1. Materiais - dissertação. 2. Sinter. 3. Minério de ferro. 4. Combustíveis. 5. Ferro – base magnética. I. Habibe, Alexandre. II. Centro Universitário de Volta Redonda. III. Título.

CDD – 620.1



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS



VICENTE DE SOUSA

SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE UM SÍNTER A PARTIR DE MINÉRIO DE FERRO DE BASE
MAGNETÍTICA UTILIZANDO ROTA DE PRODUÇÃO BASEADA EM CARVÃO VEGETAL VERSUS
COQUE DE PETRÓLEO BUSCANDO COMO META, BASICIDADE PRIMÁRIA DE 1,4

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE
“MESTRE EM MATERIAIS”

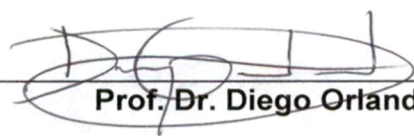
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE MESTRADO
PROFISSIONAL EM MATERIAIS


Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe
Presidente / UniFOA


Profa. Dra. Shimeni Baptista Ribeiro Daer
Examinador externo / UniFOA


Prof. Dr. Diego Orlando
Examinador externo / UERJ

Agosto de 2023.

DEDICATÓRIA

Ao meus pais João Pedro de Sousa e Aparecida do Carmo (*in memoriam*) por sempre terem me ensinado que o conhecimento é o maior bem que um ser humano pode adquirir ao longo de sua existência.

Minha esposa Angela e meus filhos Rebeca e Fábio, para que possam fazer do conhecimento um bem inalienável.

Minhas irmãs Teresa e Carmem, meu cunhado Anselmo, por terem me ajudado e amparado durante grande parte desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Ao término de mais uma etapa na busca daquilo que é o maior bem que o ser humano dispõe ao longo de sua vida, agradeço a Deus por ter me amparado nos momentos de incertezas ao longo desta caminhada; aos professores que me instruíram nas diversas disciplinas do curso; aos funcionários do Memat; e em particular meu orientador Dr. Alexandre Habibe pela forma respeitosa e sempre amigável de suas orientações.

EPÍGRAFE

A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

(Albert Einstein)

SOUSA V. 2022. **Síntese e caracterização de finos de minério de ferro com base magnetítica**. Dissertação Mestrado Profissional em Materiais – Fundação Osvaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda – 2022.

RESUMO

Em um cenário marcado pela escassez de minério de ferro granulado, é relevante avaliar a sinterabilidade de finos de minério de ferro com base magnetítica, numa perspectiva de obter uma mistura de finos, tendo como meta garantir produtividade, qualidade e parâmetros econômicos desejáveis. A metodologia usada na obtenção desta mistura centra suas atividades assumindo como premissa alternativas de fabricação baseadas na síntese e caracterização na mistura de finos de minérios de bases magnetíticas de dois combustíveis, utilizando rota de produção, tendo como base o coque de petróleo e a moinha de carvão vegetal, com os objetivos validados pelos ensaios qualitativos, buscando atingir uma basicidade primária da ordem de 1,4. Estes dois tipos básicos de misturas ponderadas foram sinterizadas e avaliadas segundo parâmetros de resistência a queda (Shatter Test). Validou-se a possibilidade de obtenção da síntese utilizando matérias primas menos nobres com adição de resíduos, com possibilidades e obtenção de um produto substituto de características aceitáveis. Neste sentido, o trabalho busca comparar características de produtos quando da utilização de dois tipos de combustível, ou seja, coque de petróleo e moinha de carvão. Os resultados e as tendências apresentadas nos testes coletados utilizando coque de petróleo e moinha de carvão evidenciam nos produtos obtidos uma clara tendência de apontar no comportamento dos combustíveis durante a execução de testes variações na performance dos produtos como: morfologia mais homogênea, granulometria, quantidade de carbono fixo, teor de umidade, poder calorífico do produto, bem como outras características intrínsecas de cada produto. Com isso, quando se avaliam os resultados obtidos das queimas, observa-se que a resistência mecânica do sinter produzido proveniente da utilização de moinha de carvão vegetal como combustível evidencia uma dificuldade na sinterização com finos de minério de base magnetítica inferior ao coque de petróleo.

Palavras-chave: Sinter; Finos de minério de ferro; Combustíveis; Ferro base magnetítica.

ABSTRACT

In a scenario marked by the shortage of granulated iron ore, it is relevant to evaluate the sinterability of iron ore fines with a magnetite base, with a view to obtaining a mixture of fines with the aim of guaranteeing productivity, quality and desirable economic parameters. The methodology used to obtain this mixture focuses its activities on the assumption of manufacturing alternatives based on the synthesis and characterization of the mixture of two-fuel magnetite-based ores fines, using a production route based on petroleum coke and coal dust plant with the objective validated by qualitative tests, seeking to reach a primary basicity of the order of 1.4. These two basic types of weighted mixtures were sintered and evaluated according to drop resistance parameters (Shatter Test). It was made valid the possibility of obtaining the synthesis using less noble raw materials with the addition of residues, aiming possibilities for a substitute product with acceptable characteristics. In this sense, the work seeks to compare product characteristics when using two types of fuel, that is, petroleum coke and coal mocha. The results and trends presented in the tests collected using petroleum coke and coal grinds show, in the products obtained, a clear tendency to point out in the behavior of the fuels during the execution of tests variations in the performance of the products such as: more homogeneous morphology, granulometry, quantity of fixed carbon, moisture content, calorific value of the product as well as other intrinsic characteristics of each product. Thus, when evaluating the results obtained from the burnings, it is observed that the mechanical resistance of the sinter produced from the use of charcoal as fuel shows a difficulty in sintering with fine ore with a magnetite base lower than that of petroleum coke.

Keywords: Sinter; Iron ore fines; Fuels; Magnetite base iron.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de usina de minério de ferro.....	255
Figura 2 - Representação clássica de um processo.....	26
Figura 3 - Modelo de Briquetadeira de Extrusão	28
Figura 4 - Modelo de briquetadeira de rolos Princípio da compressão em prensas de rolos	29
Figura 5 - Tipos de aglomeração de partículas finas, aplicando de pressão.....	29
Figura 6 - Fluxograma da utilização parcial de briquetes na mistura da carga de carvão para produção de coque.	31
Figura 7 - (A) Tambor de Pelotamento, (B) Disco de Pelotamento	33
Figura 8 - (A) Foto de Tambores de Pelotamento em operação e (B) Disco de Pelotamento em operação.	33
Figura 9 - Fluxograma típico de planta de pelotização com moagem a úmido, disco de pelotização e forno Traveling Grat	35
Figura 10 - Disco de pelotamento	36
Figura 11 - Mecanismo de formação da pelota	37
Figura 12 - Forno de Queima ou Endurecimento da Pelota.	39
Figura 13 - Esquema representação esquemática do processo de Sinterização.....	40
Figura 14 - Processo de sinterização	41
Figura 15 - Entradas e saídas no processamento do síter.....	43
Figura 16 - Os três estágios de sinterização segundo Rhines (Dehoff e Rhines.....	46
Figura 17 - Distribuição de energia dos átomos de um material para uma temperatura acima de zero Kelvin. Curva de Boltzmann.....	47
Figura 18 - Formação de pescoço (a) sem contração entre as duas partículas pelo processo de evaporação-condensação, (b) com contração das partículas pela aproximação dos centros.	48
Figura 19 - Caminhos alternativos para transporte de matéria durante os estágios iniciais da sinterização. Ver Tabela 6. Fonte: M. A. Ashby apud (Kingery et al., 1976).	49
Figura 20 - Ilustração do processo Dwigth & Lloyd Figueira em maior escala.	52
Figura 21 - Esquema do processo Dwigth & Lloyd em uma indústria	53
Figura 22 - 22 Zonas do processo de sinterização Dwigth & Lloyd.....	53
Figura 23 - Microestrutura do sinter de minério de ferro	54

Figura 24 - Distribuição granulométrica ideal para a mistura de minérios (curva de Astier).....	57
Figura 25 - Fotomicrografia de micropelotas em mistura a sinterizar resina	58
Figura 26 - Influência da basicidade na resistência do sínter.....	59
Figura 27 - Influência da basicidade na resistência a frio do sínter 2.....	60
Figura 28 - Fluxograma da metodologia.....	63
Figura 29 - Depósito de recebimento e estocagem de materiais	65
Figura 30 - Peneira Granulométrica	65
Figura 31 - Representação gráfica da divisão granulométrica dos minérios	70
Figura 32 - Área de peneiramento de material	70
Figura 33 - Modelo de peneira usado no processo de peneiramento de material.....	71
Figura 34 - Amostras de materiais peneirados.....	70
Figura 35 - Configuração de leito para sinterização	72
Figura 36 - Planta piloto de sinterização	73
Figura 37 - Misturador	74
Figura 38 - Micropelotizador tipo tambor rotativo.	75
Figura 39 - Panela.....	76
Figura 40 - Características do aparelho utilizado no Shatter Test.....	79
Figura 41 - Shatter Test utilizado para os testes.	79
Figura 42 - Caixa de Amostra.....	80
Figura 43 - Apresentação do aparelho utilizado para a realização do Shatter test ...	81
Figura 44 - Sínter produzido após a britagem	108
Figura 45 - Gráfico Produtividade (ton./m ² /Dia).....	109
Figura 46 - Gráfico Tempo de sinterização (Minutos)	110
Figura 47 - Temperatura / Depressão	111
Figura 48 - Rendimento.....	111
Figura 49 - Percentual de Finos	112
Figura 50 - Gráfico Retorno Carregado/Retorno Gerado/Balanço (%).....	113
Figura 51 - Umidade (%).....	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Alguns dos principais minerais de ferro e suas classes	20
Tabela 2 - Principais morfologias de cristais de óxidos e hidróxidos de ferro	21
Tabela 3 - Características químicas dos insumos empregados em pelletização.	38
Tabela 4 - Caminhos alternativos para transporte de matéria durante os estágios iniciais da sinterização.	49
Tabela 5 - Técnicas de mineralogia de uso mais difundido na caracterização de minérios.....	56
Tabela 6 - Propriedades físicas e químicas do sinter.....	61
Tabela 7 - Características físicas e químicas do sinter.....	62
Tabela 8 - Basicidade do minério de Baratinha.....	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Qualidade química dos materiais utilizados	66
Quadro 2 - Descrição das partículas de sinter feed dos minérios brasileiros.....	67
Quadro 3 - Relatório das Análises.....	68
Quadro 4 - Classificação de minérios retidos nos peneiramento	69
Quadro 5 - Especificações da panela e exaustor da planta piloto.....	77
Quadro 6 - Parametros do sistema de exaustão	77
Quadro 7 - Total de queimas realizadas	78
Quadro 8 – Materiais de alimentação da Queima N#1 – Teste 1	83
Quadro 9 - Dados do processo da queima N#1- Teste 1	84
Quadro 10 - Resultados da queima # 1- Teste 1.....	85
Quadro 11 - Materiais de alimentação da Queima N#1 – Teste 2.....	86
Quadro 12 - Dados do processo da queima N#1 – Teste 2	87
Quadro 13 - Resultados da queima # 1 – Teste 2.....	88
Quadro 14 - Materiais de alimentação da queima N#1 – Teste 3	90
Quadro 15 - Dados do processo da queima # 1 – Teste 3.....	91
Quadro 16 - Resultados da queima # 1 – Teste 3.....	92
Quadro 17 - Materiais de alimentação da queima # 2 – Teste 6.....	94
Quadro 18 - Dados do processo da queima # 2 – Teste 6.....	95
Quadro 19 – Resultados da queima # 2 – Teste 6	96
Quadro 20 - Materiais de alimentação da queima # 2 – Teste 7	98
Quadro 21 - Dados do processo da queima # 2 – Teste 7.....	99
Quadro 22 – Resultados da queima # 2 – Teste 7	100
Quadro 23 – Materiais de alimentação da queima # 2 – Teste 8	102
Quadro 24 - Dados do processo da queima # 2 – Teste 8.....	103
Quadro 25 – Resultados da queima # 2 – Teste 8	104
Quadro 26 – Parâmetros das Queimas N#1, N#2, N#3.....	106
Quadro 27 - Resultados Do Teste de Queda	115

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resultados da Queima # 1-Teste 1	85
Gráfico 2 - Resultados da queima # 1 – Teste 2	89
Gráfico 3 - Resultados da queima # 1 – Teste 3	93
Gráfico 4 - Resultados da Queima # 2 – Teste 6	97
Gráfico 5 - Resultados da Queima # 2 – Teste 7	101
Gráfico 6 - Resultados da Queima # 2 – Teste 8	105

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
JSP	<i>Java Server Pajés</i> (Páginas do Servidor Java)
Meme	Mestrado Profissional em Materiais
SQL	<i>Structured Query Language</i> (Linguagem de Consulta Estruturada)
Mesh	Números de abertura por polegadas em peneiras granulométricas.
MtCO _{2e}	Toneladas de carbono por escopo.
Fet	Ferro Total

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos específicos.....	18
1.1.3	Justificativa	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Minerais de Ferro – Principais Tipos e Morfologia	19
2.2	Jazidas de Minério de Ferro no do Brasil	22
2.2.1	Minérios de Ferro no Brasil.....	22
2.3	Tratamento ou Beneficiamento de Minérios	23
2.3.1	Procedimento.....	22
2.4	Processo	26
2.4.1	Definição.....	26
2.4.2	Características específicas de um processo	26
2.5	Processos utilizados nas industriais metalúrgicas.....	26
2.5.1	Processo aglomeração	26
2.5.2	Briquetagem	27
2.5.3	Pelotização	31
2.5.4	Processo de sinterização.....	39
2.5.4.1	Características específicas do processo de sinterização	39
2.5.4.2	Fundentes na sinterização.....	41
2.5.4.3	Etapas no processo de sinterização	44
2.5.4.4	Os estágios do processo da sinterização	45
2.5.4.5	Difusão atômica	46
2.5.4.6	Tipos de difusão atômica.....	50
2.5.5	Técnicas de caracterização para minério de ferro	54
2.5.5.1	Resistência a Frio do Sínter	58
2.5.5.2	Qualidade do Sínter.....	60
3	MATERIAIS E MÉTODOS	63
3.1	Materiais	65
3.1.1	Coleta de Materiais.....	65
3.1.2	Caracterização dos Materiais de Partida	66

3.2	Métodos	69
3.2.1	Granulometria do minério	69
3.2.1.1	Peneiramento	70
3.2.2	Leito de Fusão.....	72
3.2.3	Planta Piloto de Sinterização.....	73
3.3	Caracterização Mecânica dos Materiais	78
3.3.1	Caracterização do Sínter produzido	78
3.3.1.1	Shatter Teste	78
3.3.1.2	Caixa da amostra.....	80
3.3.1.3	Detalhamento da caixa de amostra	81
3.3.2	Determinação da Mistura padrão % de Carvão	82
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	108
5	CONCLUSÃO	117
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	118
	REFERÊNCIAS	119

1 INTRODUÇÃO

Grande parte dos recursos extraídos pelo homem da natureza é de origem mineral. Todavia, estes recursos não são renováveis e não se encontram em seu jazimento condições de serem diretamente utilizados na obtenção de bens de consumo e de produção. A fim de adequá-los à produção desses bens, os minerais precisam ser submetidos a algum tipo de beneficiamento, pelo qual eles são modificados, purificados e transformados (Luz *et al.*, 2010).

Etapas como tratamentos ou beneficiamento de minérios de ferro são operações que permitem modificar a granulometria e concentração dos minerais, conservando a identidade química ou física dos minérios que a compõem.

Para que um mineral seja concentrado, é necessário que o mineral esteja fisicamente liberado, ainda que apenas parcialmente.

Dessa forma, este trabalho incorpora as novas demandas e busca a utilização de um fino de minério, a princípio, com baixa sinterabilidade; também, equilibrar parâmetros de processos para estabelecer condições ajustadas de processamento.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O foco do trabalho é avaliar a sinterabilidade de finos de minério de ferro com base magnetítica, numa perspectiva de obtenção de uma mistura de finos apropriada, visando um processo com maior produtividade e que garanta qualidade e parâmetros econômicos desejáveis. O trabalho aponta para a mensuração e qualificação dos indicadores operacionais e de performance química/resistência mecânica, utilizando como base um fino de minério de ferro de gênese magnetítica na mistura. Para esta finalidade, estabelecem-se algumas rotas de processamento, utilizando como combustível coque de petróleo ou moinha de carvão vegetal para a síntese de um sínter com 1,4 de basicidade.

1.1.2 Objetivos específicos

O sínter será processado e testado em planta piloto localizada em Santa Luzia, MG, de propriedade da THI Metalurgia Ltda. Tomou-se como base de síntese a utilização de percentuais em massa de moinha de carvão vegetal e de coque de petróleo. Também serão testadas misturas que encaminhem basicidade primária com patamar de 1,4. As partes serão misturadas em misturador intensivo, micro-pelotizadas em tambor rotativo e processadas (queima) em panela basculante. A partir do sínter obtido em cada mistura, serão processadas análises químicas e os testes mecânicos para avaliação de composição e resistência mecânica.

1.1.3 Justificativa

Devido à crescente escassez de minérios de ferro de boa concentração, minério bitolado de alto teor e com sílica e fósforo limitados às demandas dos altos fornos, cabe buscar novas fontes de finos com qualidade superior para encaminhar o processamento destas matérias primas com características químicas adequadas a redução, como no caso dos finos de ferro de origem magnetítica, que a princípio se mostram particularmente de difícil sinterabilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Minerais de Ferro – Principais Tipos e Morfologia

Os minerais de ferro se encontram na forma de rochas a partir das quais pode ser obtido o ferro metálico de maneira economicamente viável. O ferro encontra-se geralmente sob a forma de óxidos, como a hematita, a magnetita ou ainda como óxido-hidróxido de ferro. (DANA et al., 1984).

Mesmo considerando a grande quantidade de minerais de ferro disponíveis na natureza, poucas são as classes consideradas economicamente aptas a serem explotáveis, uma vez que esta condição existe em função da quantidade ou concentração de ferro presentes nas rochas de origens destes minerais. Os minérios de ferro considerados explotáveis economicamente são agrupados em função da composição química nas classes: óxidos, sulfetos, carbonatos e silicatos. Uma classe de mineral pode ser representada por um ou mais minerais. A Tabela 1 apresenta alguns dos principais minérios de ferro e suas classes.

A hematita Fe_2O_3 é o principal mineral de ferro devido à sua larga ocorrência, sendo encontrada na forma de óxido e com diferentes morfologias, conforme Tabela 2 (GOMES et al., 2013). A hematita também pode ser encontrada com hábito de magnetita; essa forma é chamada de pseudomorfismo, ou seja, a forma herdada de outro mineral. Esta geração de hematita é resultado da oxidação e recristalização da magnetita (NEUMANN, 2014).

A Magnetita é um mineral formado pelos óxidos de ferro II e III, cuja fórmula química é Fe_3O_4 . O mineral apresenta forma cristalina isométrica, geralmente na forma octaédrica, e caracteriza-se por forte magnetismo.

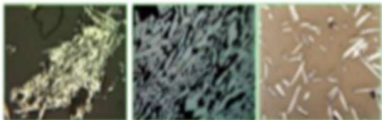
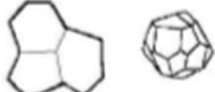
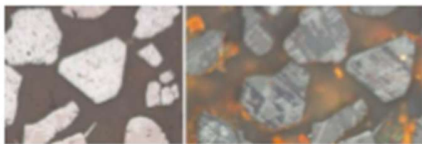
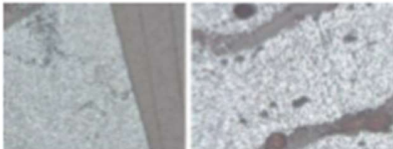
A Goethita $\text{FeO}(\text{OH})$ é produto de alteração de minerais que contêm ferro. É enriquecida por processos supergênicos (lixiviação), encontrando-se nas formas maciças e terrosas.

Tabela 1 - Alguns dos principais minerais de ferro e suas classes

Classes	Minerais	Composição Química	Teor de Fe (%)	Designação
Óxidos	Magnetita	Fe_3O_4	72,4	Óxido ferroso-férrico
	Hematita	Fe_2O_3	69,9	Óxido férrico
	Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$	62,8	Hidróxido de ferro
	Lepidocrosita	$\text{FeO}(\text{OH})$	62,9	Hidróxido de ferro
Carbonato	Siderita	FeCO_3	48,2	Carbonato de Ferro
Sulfetos	Pirita	FeS_2	46,5	
	Pirrotita	FeS	63,6	
Silicatos	Fayalita	$\text{Fe}_2^{2+}(\text{SiO}_4)$	54,81	Grupo da olivina
	Greenalita	$\text{Fe}^{2+}_{2,3}\text{Fe}^{3+}_{0,5}\text{Si}_{1,2}\text{O}_5(\text{OH})_{3,3}$	44,14	Grupo da Serpentina
	Grunerita	$\text{Fe}^{2+}_7(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	39,03	Grupo dos Anfibólios

Fonte: 2014 MSc-PEMM-Ligia_Mara_Gonzaga (Modificado de DANA & HULBURT, 1984)

Tabela 2 - Principais morfologias de cristais de óxidos e hidróxidos de ferro

Tipo	Característica	Forma/ Textura	Ilustração Esquemática
Hematita Especular	Porosidade: compacta Contatos: laterais retilíneos Granulometria: fina (0,01 a 0,03mm) grossa (>0,22mm)		
Hematita Granular	Porosidade: compacta Formatos: regulares Contatos: retilíneos Granulometria: fina (0,01 a 0,03mm) grossa (>0,22mm)		
Hematita Sinuosa ou Lobular	Porosidade: compacta Contatos: irregulares, entrelaçados Aspectos: granular com cristais irregulares Granulometria: fina (0,01 a 0,03mm) média (0,04 a 0,11mm)		
Hematita Martítica	Porosidade: porosos Contatos: laterais retilíneos preserva o hábito da magnetita Aspecto: granular Granulometria: fina (0,01 a 0,03mm) grossa (>0,22mm)		
Hematita Microcristalina	Textura: Porosa Contatos: Pouco desenvolvidos Granulometria: (0,01mm)		

Fonte: 2014 MSc-PEMM-Ligia_Mara_Gonzaga (modificado de Gomes et al., 2013)

2.2 Jazidas de Minério de Ferro no do Brasil

No Brasil as reservas de minério de ferro estão localizadas principalmente: no estado de Minas Gerais, no Quadrilátero Central ou ferrífero, respondendo por grande quantidade de ferro extraída e produzida no país, incluindo em menor escala a produção de bauxita e cassiterita; Maciço do Urucum, em Mato Grosso do Sul, com extração e produção também de minério de ferro e manganês nas margens do rio Paraguai. A Vale S.A. é responsável por 50% da produção de minério no Brasil (DNPM, 2013), dividida em dois sistemas: Norte e Sul. O Sistema Sul da Vale corresponde ao Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais. Suas unidades de operação são: Mina Tamanduá, Mina Capitão do Mato, Mina Abóboras, Mina Jangada, Mina Mar azul, Mina Capão Xavier, Mina Pico, Mina Galinheiro, Mina Sapecado, Mina Fábrica e Mina Córrego do Feijão. A grande variedade de microestruturas e texturas encontradas nos minérios de ferro gera uma ampla diversidade de propriedades físicas com importantes implicações para o seu beneficiamento. As reservas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero da Vale são responsáveis por 84,52% da produção brasileira no setor (IBRAM, 2012). A região do Quadrilátero Ferrífero possui importantes depósitos de minério de ferro itabiríticos e hematíticos de alto teor ($Fe > 60\%$). Os itabiritos são constituídos por bandas ricas em minerais de ferro (principalmente hematita e magnetita) intercaladas com bandas ricas em quartzo. Os minérios de alto teor são compostos principalmente pela hematita (Rosière et al., 1991). No sistema norte estão as principais jazidas existentes na região, que são Serra dos Carajás e Oriximiná, no Pará, sendo que a Serra dos Carajás, situada no Parque Ecológico de Carajás, município de Parauapebas, no sudeste do estado, foi responsável por um grande projeto de mineração, idealizado na década de 1960, devido à sua abundância em minério de ferro, bem como outros minerais, tais como manganês, níquel, cobre, estanho e ouro. Tendo o minério de ferro da melhor qualidade em todo o globo terrestre, é considerada também como a maior província mineral do mundo. Na Serra de Oriximiná é extraída a bauxita.

2.2.1 Minérios de Ferro da Classe Óxidos no Brasil

Os minerais de ferro se encontram na forma de rochas a partir das quais pode ser obtido o ferro metálico de maneira economicamente viável, sendo os principais a

Magnetita, a Hematita, a Goetita e a Lepdocrosita. O ferro encontra-se geralmente sob a forma de óxidos, como a hematita, a magnetita ou ainda como óxido-hidróxido de ferro. (Dana et al., 1984).

A Magnetita é um mineral formado pelos óxidos de ferro II e III, cuja fórmula química é Fe_3O_4 . O mineral apresenta forma cristalina isométrica, geralmente na forma octaédrica, e caracteriza-se por forte magnetismo. Entre os minerais ferromagnéticos, a Magnetita é o mais importante encontrado na natureza, estando presente nas rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, apresentando estrutura espinélio inversa formando uma rede cúbica de face centrada.

Com a necessidade de se tornarem mais competitivas no mercado, empresas do setor mineral buscam desenvolver metodologias e técnicas com ênfase na concentração e produção de elementos minerais que antes eram descartados, como rejeitos do seu processo de produção mineral. Com isso, essas empresas formam coprodutos, geram receitas e contribuem com a redução de impactos ambientais causados pelo descarte.

2.3 Tratamento ou Beneficiamento de Minérios

2.3.1 Procedimentos

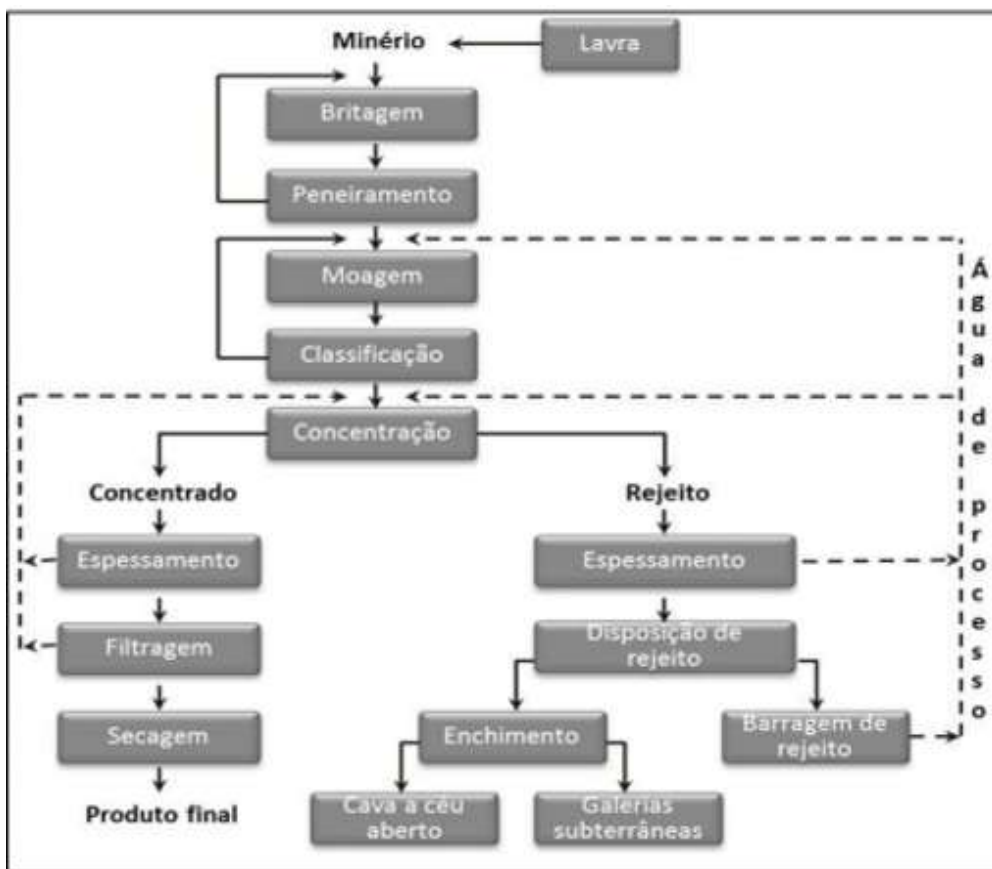
Trata-se de uma sequência de operações que, aplicadas aos minerais, visa alterar sua granulometria, bem como a concentração relativas dos minerais presentes ou sua forma. Alguns autores acrescentam neste conceito que os minerais neste processo são passíveis de sofrerem alterações químicas resultantes da presença de calor, gerado pelo aumento da temperatura no processo de decomposição.

Os processos de aglomeração de finos de minérios (briquetagem, pelotização e sinterização), a ustulação e a calcinação são entendidos como tratamentos de minérios. Entende-se como mineral, ou substância mineral, todo corpo inorgânico de composição química com propriedades físicas definidas encontradas na crosta terrestre. Minério é toda rocha constituída de um mineral ou agregado de minerais que contém um ou mais minerais valiosos, que podem ser aproveitados economicamente, chamados de minerais minérios. O mineral ou conjunto de minerais que não são aproveitados economicamente são denominados ganga.

A concentração ou separação seletiva de materiais é obtida por meio da diferença de propriedades, entre o mineral-minério (o mineral de interesse) e os minerais de ganga. Entre estas diferenças de propriedades se destacam: massa específica, propriedades magnéticas, condutibilidade elétrica, radioatividade, cor, forma, propriedades químicas. Para que um minério seja considerado concentrado, os minerais contidos neste minério têm que estar separados em sua forma física, de modo que uma partícula contenha somente uma espécie mineralógica. O processo de liberação do minério do mineral é feito com uma sequência de atividades, compreendendo redução de seu tamanho ou cominuição por meio de britagem e ou moagem. Como neste processo o consumo de energia é grande, o que torna as operações caras, deve-se fragmentar estritamente o necessário para as operações posteriores. Os impactos deste custo podem ser minimizados através da implementação de processos de classificação ou separação dos minerais por tamanhos, como peneiramento e ciclonagem, a fim de evitar o excesso de cominuição. Ao final deste processo de redução de tamanho com a liberação de minerais, procede-se a separação das espécies, com a identificação dos concentrado e dos rejeitos.

O termo concentração significa, geralmente, remover a maior parte da ganga, presente em grande proporção no minério. A purificação, por sua vez, consiste em remover do minério (ou pré-concentrado) os minerais contaminantes que ocorrem em pequena proporção. Na maioria das vezes, as operações de concentração são realizadas a úmido. Antes de se ter um produto para ser transportado, ou mesmo adequado para a indústria química ou para a obtenção do metal por métodos hidro-pirometalúrgicos (áreas da Metalurgia Extrativa), é necessário eliminar parte da água do concentrado. Estas operações compreendem desaguamento (espessamento e filtração) e secagem. A Figura 1 mostra um fluxograma típico de tratamento de minérios, com recirculação de água. O minério bruto (com frequência denominado ROM, de “run-of-mine”) procedente da etapa de lavra de uma mina passa por diversas operações unitárias, que são assim classificadas:

Figura 1 - Fluxograma de usina de minério de ferro



Fonte: Projeto Carajás - VALE.

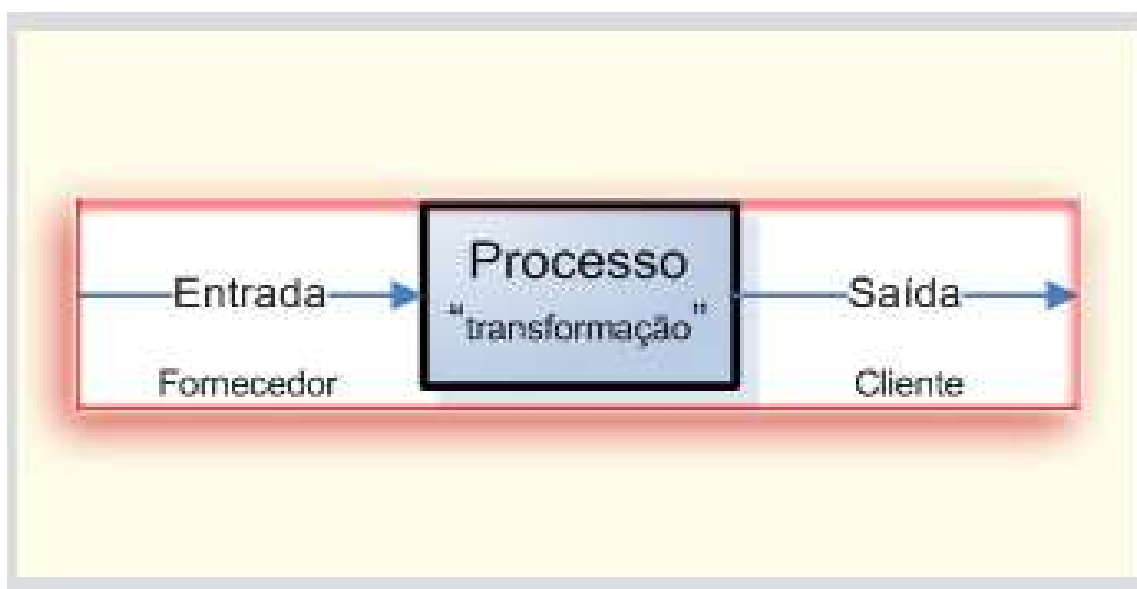
- concentração gravítica, magnética, eletrostática, flotação, floculação seletiva etc.;
- desaguamento do concentrado (decantação, espessamento e filtragem);
- desaguamento do rejeito (espessamento), seguido de recuperação de água para o processo;
- secagem do concentrado em secador rotativo, spray dryer, secador de leito fluidizado;
- disposição de rejeito em cavas de mina a céu aberto, galeria subterrânea, barragem de rejeito.

2.4 Processo

2.4.1 Definição

“Processo” é como um conjunto de atividades inter-relacionadas ou interativas que transforma insumos (entradas) em produtos (saídas)”. ISO 9000:2005

Figura 2 - Representação clássica de um processo.



Fonte: <https://www.tjpr.jus.br/tecnologia> 2019

2.4.2 Características específicas de um processo

Um processo deve ser um trabalho contínuo, rotineiro e com etapas definidas e repetitivas, que gere resultados constantes e padronizados durante os ciclos de operações. Deve, também, ser permanente e replicável, a fim de entregar de forma fiel o produto esperado no final das diversas etapas que compõem sua produção, de modo a agregar valor às entregas para clientes.

2.5 Processos utilizados nas indústrias metalúrgicas

2.5.1 Processo aglomeração

É um dos métodos mais antigos de produção de corpos sólidos, como metais, cerâmica, vidros e materiais refratários. Constitui-se no aquecimento de pós finos controlados em condições de temperatura, tempo e atmosfera específicas,

promovendo difusão atômica na superfície das partículas, tornando-as aglomerados de elevada resistência mecânica. (BROPHY et al., 1972; REED, 1986; KINGERY et al., 1976; MALAN et al., 2004).

Pesquisas arqueológicas têm mostrado que a produção de armas, lanças e ferramentas pelo homem existia há cerca de 6000 anos a. C., oriundas da mistura de aglomerados de minérios de ferro. Mas, somente a partir do século XIX foram intensificados os trabalhos que resultaram nas melhorias para o desenvolvimento da moderna tecnologia do pó, sendo o ano de 1829 um verdadeiro marco no desenvolvimento desta tecnologia, com a produção de platina maleável que até esta data não podia ser processada por fundição normal devido a seu alto ponto de fusão (em torno de 1775° C.). No século XX foram desenvolvidos processos para obter peças de tungstênio e de molibdênio, tornando estes processos, por razões tecnológicas e econômicas, altamente competitivos. Contudo, o grande desenvolvimento destes processos veio com a segunda guerra mundial, para atendimento da crescente indústria automobilística.

Cabe ainda salientar que os processos de aglomeração surgiram com o objetivo de aproveitar a grande quantidade de finos que ficavam acumulados durante a produção de minérios granulados ou para aproveitamento de minérios pobres que necessitavam de concentração prévia, por isso a sua aplicação para materiais cerâmicos e minerais (BROPHY et al., 1972; REED, 1986; KINGERY et al., 1976; CHIAVERINI, 1986; MOURÃO, 2007; DEHOFF, 1968).

Dentre os principais de processos de aglomeração destacam-se:

- Briquetagem
- Pelotização
- Sinterização

2.5.2 Briquetagem

É o processo de densificação de pós através da compactação dos mesmos, a fim de conferir maior densidade, tamanho, forma e propriedades uniformes, utilizando ou não aglomerantes.

O briquete é composto de aglomerado formado por minério de ferro com uma solução de aglomerantes, que inclui na sua composição, areia proveniente de tratamento de rejeitos de mineração sem passar pelo processo de queima. Envolve as etapas de prensagem, mistura e secagem a temperatura de 200°C; é capaz de resistir a elevadas temperaturas nos processos de obtenção da gusa e/ou esponjas nos altos fornos sem se desintegrar.

Essa tecnologia disruptiva obtida em 18 anos de pesquisa, com elevado índice de inovação, possui patente registrada em 43 países. Além de elevar o valor agregado dos produtos siderúrgicos nas diversas etapas dos processos na siderurgia, contribui de forma significativa na diminuição dos impactos ambientais: menor emissão de gases como dióxido de carbono (CO_2), dióxido de enxofre (SOX), óxido de nitrogênio (NOX); menor consumo de água no processo de produção, não necessita dos 1350°C utilizados nos processos de pelotização/sinterização; avanços sem precedência na cadeia de produção de aços e com efeitos extremamente positivos, com a diminuição de emissão de particulados na atmosfera.

Dentre os tipos de briquetadeiras temos:

- O tipo extrusoras: em que o material é compactado ao sair da matriz e os briquetes cortados nas dimensões desejadas.

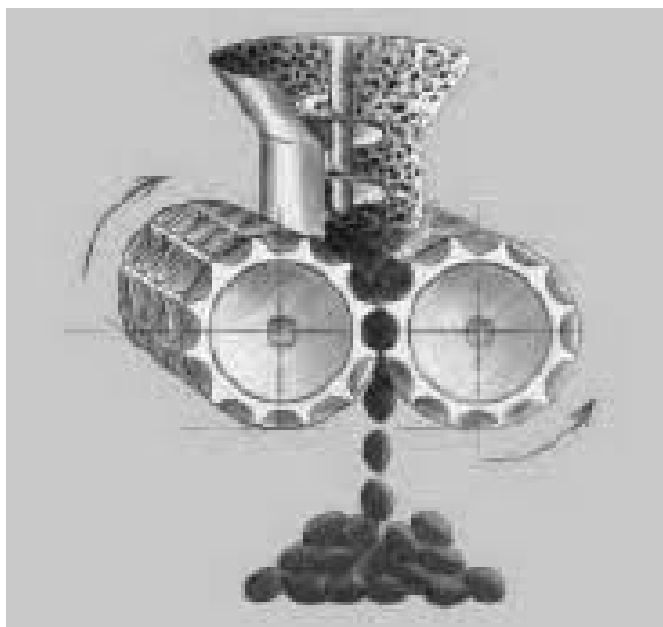
Figura 3 - Modelo de Briquetadeira de Extrusão



Fonte: Internet www.lippel.com.br 2020

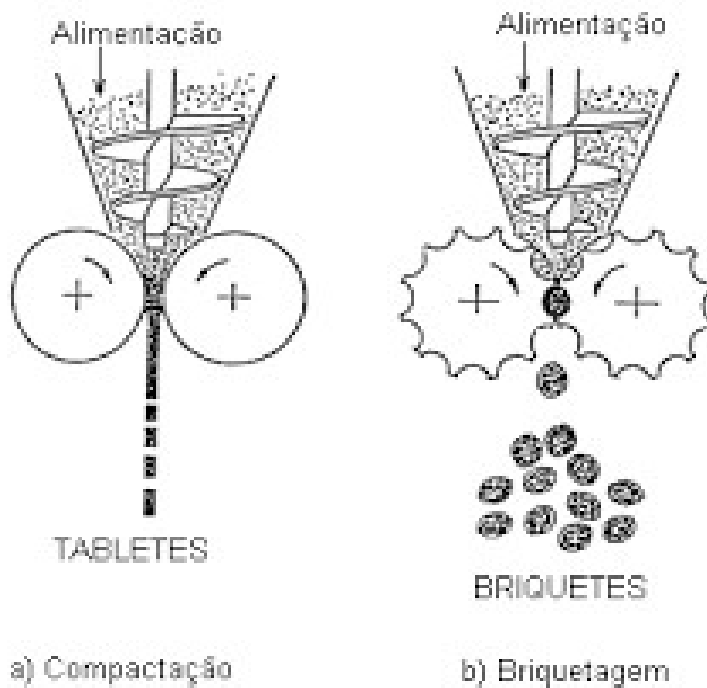
- o tipo rolo: a carga e alimentação é feita por gravidade ou através de um eixo sem fim até o rolo onde é compactada. É mais usada na indústria siderúrgica.

Figura 4 - Modelo de briquetadeira de rolos: princípio da compressão em prensas de rolos



Fonte: CETEM - Tratamento de Minérios 5ª Edição

Figura 5 - Tipos de aglomeração de partículas finas, aplicando-se pressão.



Fonte: CETEM - Tratamento de Minérios 5ª Edição

No processo de compactação (Figura 2a), a vazão de tabletes gerados, m , pode ser obtida pela seguinte relação.

$$m = B \times S \times [1]$$

onde:

B - Largura do rolo; V_p - velocidade periférica do rolo;

S - Espessura do tablete; d_a - densidade do aglomerado.

Já no processo de briquetagem (Figura 2b), a vazão de briquetes, M , é calculada em função do volume de um briquete (V_b), do número de moldes em uma coluna (Z) na circunferência do rolo (8), do número de colunas ao longo da largura do rolo (R), da velocidade dos rolos (N , em rpm) e da densidade do briquete (d_b).

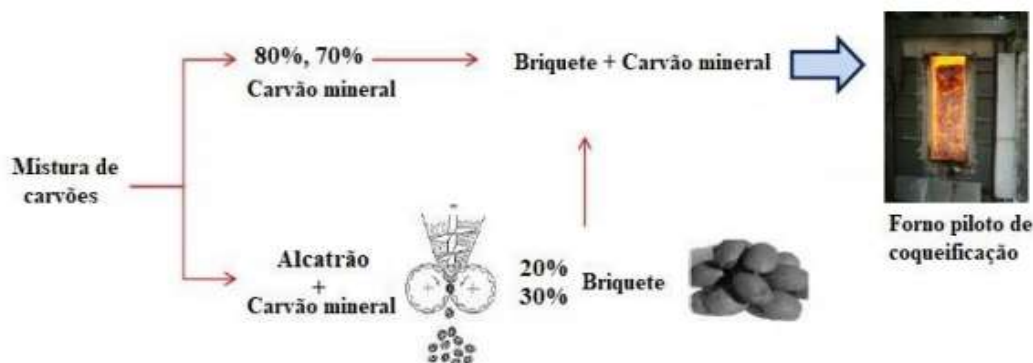
$$M = V \times Z \times R \times N \times [2]$$

Exemplos de aplicação de briquetagem podem ser vistos:

- Na aciaria, a utilização dos briquetes pode ser usada em substituição a sucatas.
- Briquetes oriundos de finos de ferro esponja para diminuir a reatividade (oxidação) e facilitar o transporte dos mesmos.

A Figura 6 mostra o fluxograma da produção do coque metalúrgico através da inserção de briquetes como parte da carga do forno de coqueificação. Esta tecnologia de adensamento de carga utilizando briquetes de carvão mineral já é muito bem consolidada desde 1980 por grandes empresas como a Baosteel, na China, e JFE Steel, no Japão (SILVA et al., 2016).

Figura 6 - Fluxograma da utilização parcial de briquetes na mistura da carga de carvão para produção de coque.



Fonte: PDF REDEMAT repositório.ufop.br 2020

2.5.3 Pelotização

O processo de pelotização é obtido por uma mistura de finos de minério de ferro umedecida, com concentração na fração menor que 0,149 mm, com quantidade de aglomerantes, óxidos básicos e energéticos pré-estabelecida, seguida de um processo de rolamento em disco ou tambor, gerando um aglomerado esférico com dimensões variando entre 8 e 18 mm, formada pela ação de tensão superficial de capilaridade. Após serem submetidas a um tratamento térmico específico, apresentam elevada resistência mecânica ao manuseio e propriedades metalúrgicas maiores, quando submetidas ao processo de redução.

É um processo relativamente novo se comparado com a história da mineração e metalurgia, cujo desenvolvimento surgiu no século XX, criado com objetivo de aproveitar finos de minérios gerados na fase de larva e beneficiamento que, em função da grande dificuldade de manuseio e transporte, inviabilizava seu aproveitamento no processo de redução pelo fato de provocar, principalmente, a diminuição da permeabilidade dos gases no interior dos altos-fornos. Além disso, os materiais finos que são carregados pelo fluxo de gases durante o processo de redução lançam na atmosfera grande emissão de poeiras que afetam o meio ambiente.

Durante anos os carregamentos dos altos-fornos eram feitos por minérios britados parcialmente nas minas ou nas siderúrgicas, sendo as frações grossas deste processo aproveitadas e as frações finas acumuladas em pilhas ou bacias por falta de aproveitamento econômico viável. Este foi o motivo que gerou interesse em estudos

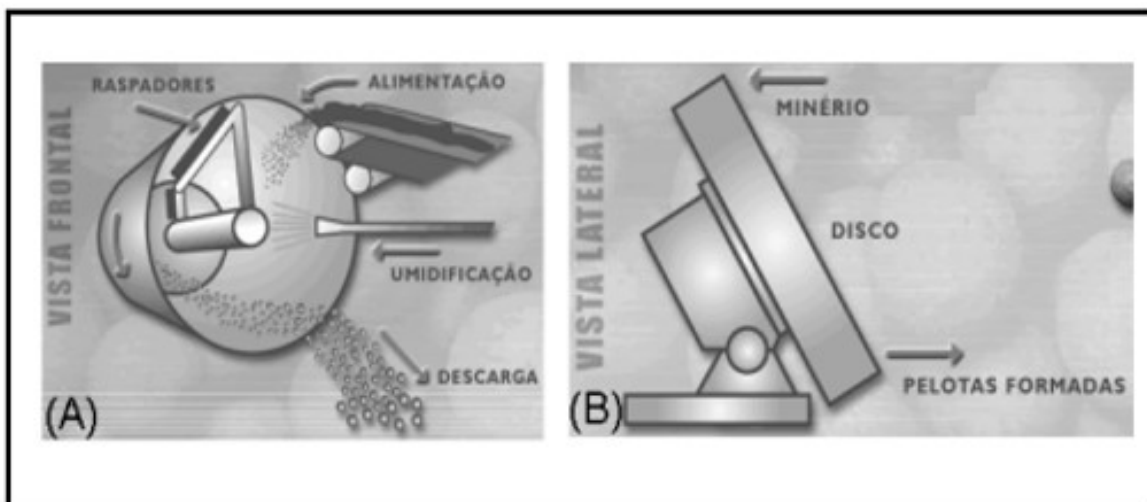
para utilização destes finos de pó. Tais estudos culminaram com o desenvolvimento de novas tecnologias de aglomeração, inicialmente com a sinterização que aproveita finos de minérios de ferro com distribuição granulométrica variando de tamanhos entre 1,0 mm e 0,15 mm, e posteriormente como alternativa à pelletização para aproveitar finos de minérios de ferro com frações abaixo de 0,15 mm

As primeiras patentes do processo de aglomeração de finos de minério de ferro por pelletização surgiram na Europa, precisamente na Suécia, em 1912, pelo inventor A. G. Anderson, porém sem aprofundamento de informações. Simultaneamente, na Alemanha, em 1913, o inventor C.A. Brackelsberg complementou os estudos de Anderson, ao apresentar evidências de que os aglomerados esféricos produzidos poderiam ser reduzidos mais rapidamente que o minério granulado e que os aglomerados de Sinterização produzidos com o mesmo minério de ferro.

A construção da primeira planta piloto de pelletização foi em 1926 na Alemanha, com capacidade de produção de 120 toneladas por dia, logo após a primeira guerra mundial; foi reconstruída em 1935. Com o aumento do desenvolvimento tecnológico da mineração do minério de ferro a partir de 1940, o processo de pelletização teve um papel relevante no segmento de produção de aço devido, primeiramente, à descoberta de seu potencial de agregar valores na cadeia de produção, bem como pela possibilidade de viabilização da lavra e beneficiamento de minérios menos compactos, friáveis e de menor teor de ferro. (CETEM, 2010).

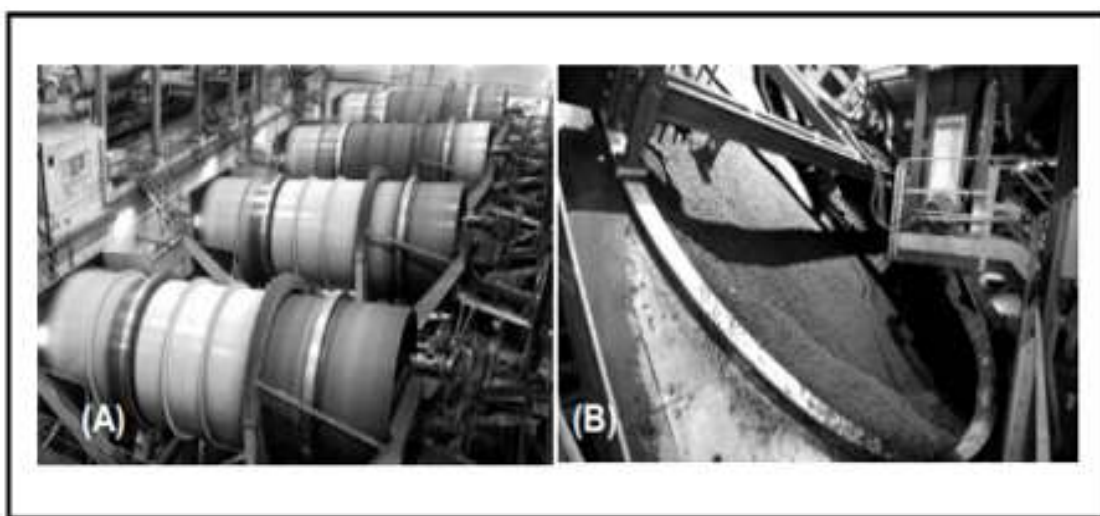
Com o surgimento de diferentes rotas de produção nas etapas de pelletamento, aparece o desenvolvimento dos discos e tambores de pelletização, conforme mostrado nas Figuras 7 e 8.

Figura 7 - (A) Tambor de Pelotamento, (B) Disco de Pelotamento



Fonte: CETEM - Tratamento de Minérios 5ª Edição

Figura 8 - (A) Foto de Tambores de Pelotamento em operação e (B) Disco de Pelotamento em operação.



Fonte: CETEM - Tratamento de Minérios 5ª Edição

Conforme CETEM (2010), no processo de queima das pelotas apareceram três tipos diferentes de fornos.

- (i) Os fornos rotativos (Grate Kiln), bastante difundidos na China;
- (ii) Os fornos de grelha móvel (Traveling Grate), adotados em larga escala em todo o mundo, principalmente nos Estados Unidos e no Brasil;
- (iii) Os fornos de cuba (Shaft Furnaces), que tendem a cair em desuso devido à sua limitação de produção e elevado custo operacional, em

comparação com os outros tipos de fornos, sendo mais encontrados na China.

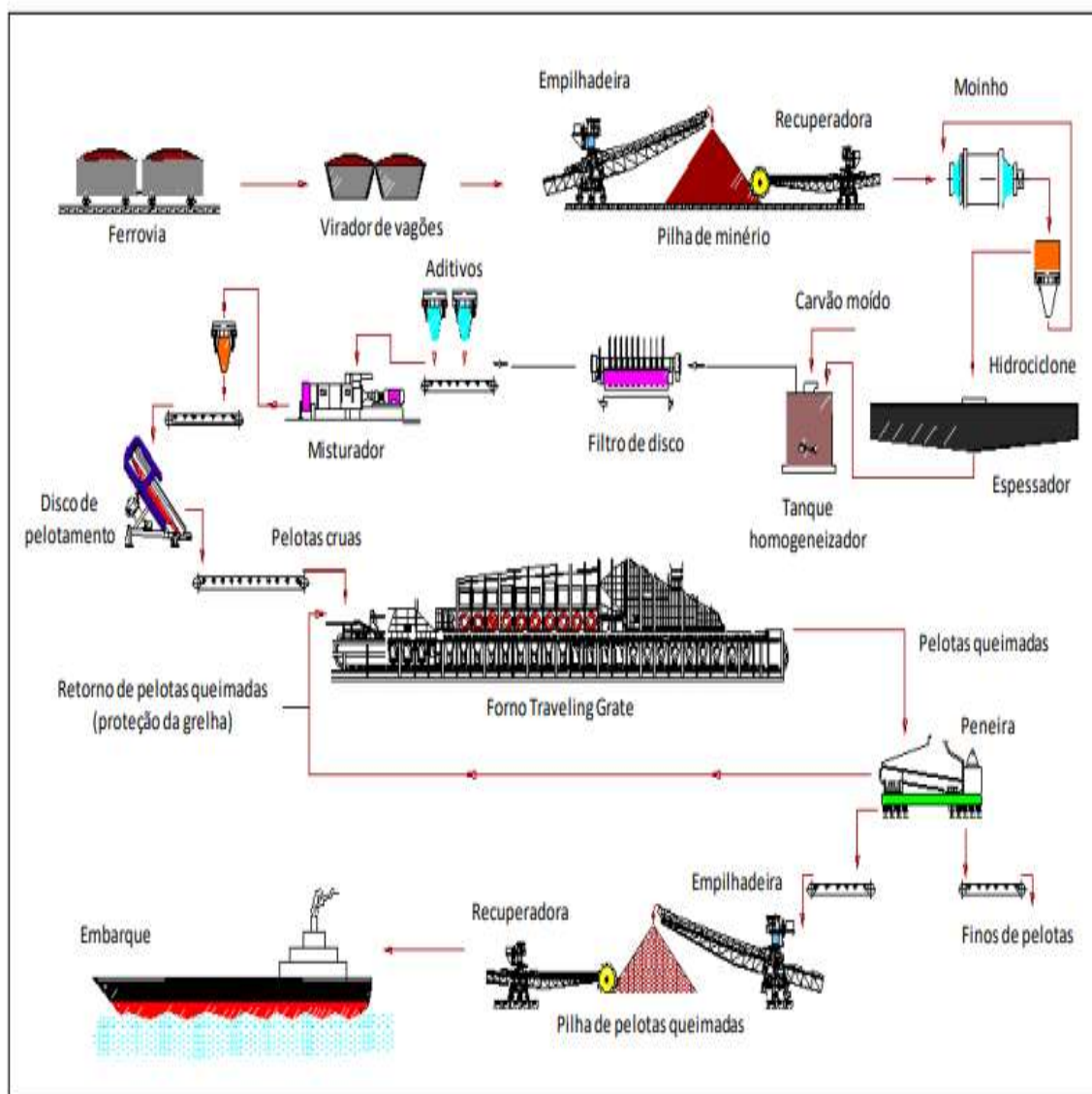
Atualmente, a tecnologia de Traveling Grate equivale a 2/3 da capacidade total de produção de pelotas no mundo, assim distribuídos:

- (i) Shaft Furnace: 31 Mt/ano (7%)
- (ii) Rotary Kiln: 136 Mt/ano (31%)
- (iii) Traveling Grate: 272 Mt/ano (61%)
- (iv) Outras tecnologias consideradas obsoletas: 4,4 Mt/ano (1%)

No Brasil predomina o uso de disco de pelotização (93,15%), ficando o uso de tambores restrito a uma unidade em Congonhas, Minas Gerais, respondendo por 6,9% da produção de pelotas do Brasil.

Ainda segundo CETEM (2010), 100 % das plantas instaladas no Brasil estão instaladas com fornos do tipo Traveling Grate e estão instaladas em São Luís, no Maranhão (uma planta), Vitória (sete plantas), Anchieta, no Espírito Santo (três plantas) e Vargem Grande, em Minas Gerais, (uma planta).

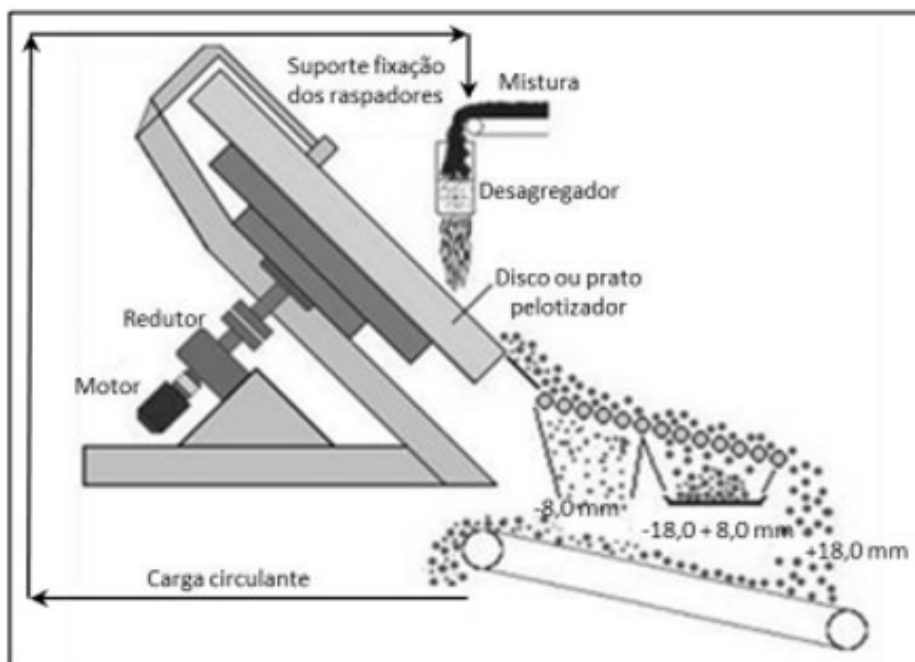
Figura 9 - Fluxograma típico de planta de pelletização com moagem a úmido, disco de pelletização e forno Traveling Grate



Fonte: José Murilo Mourão - Aspectos Conceituais Relativos à Pelotização de Minérios de Ferro

Segundo CETEM (2010), houve a adequação e incorporação de novas tecnologias nos processos de pelletização a partir de 1990, gerados em função do aumento da demanda na produção, como a introdução de uma etapa de cominuição do pellet feed logo após sua filtragem, a fim de aumentar a superfície específica das partículas e o peneiramento das pelotas cruas em mesas ou peneiras de rolos. Tal processo visa eliminar finos de modo a atender às exigências ambientais, com inclusão de técnicas de despoeiramento com precipitadores eletrostáticos nos fornos de queima das pelotas, bem como a utilização de poliméricos para suprimento de poeiras geradas durante o manuseio de pelotas prontas.

Figura 10 - Disco de pelotamento



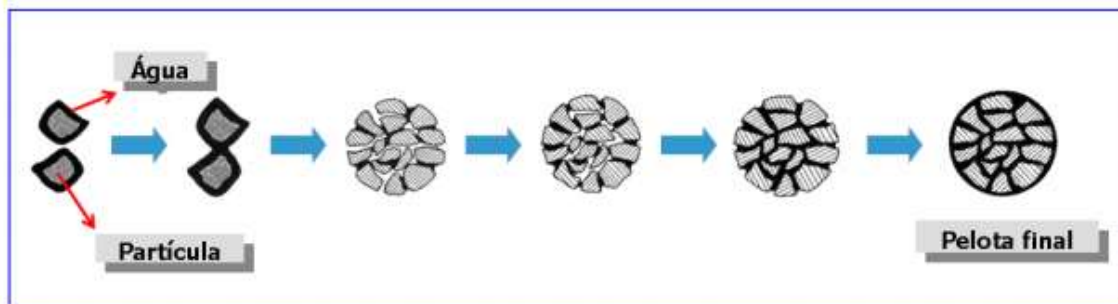
Fonte: (FONSECA 2003)

O conjunto brasileiro de usinas de pelotização é composto de 9 (nove) usinas, com capacidade instalada de 50,0Mt/ano. O complexo de usinas de pelotização instalado em Tubarão/ES é composto de duas usinas pertencentes à VALE e cinco usinas de empresas coligadas (Joint Ventures) à VALE: NIBRASCO (Japão) – duas usinas, ITABRASCO (Itália), HISPANOBRAS (Espanha) e KOBRASCO (República da Coreia). A VALE opera também a Usina de Fábrica (Congonhas/MG) e a de Ponta da Madeira/MA. A SAMARCO opera duas usinas no município de Ponta do Ubu/ES.¹

Os insumos usados são: bentonita, carvão mineral (antracito), magnesita/olivina, calcário, aglomerantes orgânicos e, em algumas situações, cal hidratada. A mistura destes insumos ao pellet feed é feita nas devidas proporções, visando sempre a uma perfeita homogeneização do material a ser inseridos nos discos ou nos tambores de alimentação. Na tabela 5 temos as características químicas típicas dos insumos empregados em pelotização.

¹ **Fonte:** - Home pages das empresas VALE, Minerações Brasileiras Reunidas S/A-MBR, Companhia Siderúrgica Nacional-CSN e Samarco Mineração S/A - Home Page do IBS-Instituto Brasileiro de Siderurgia, Revista Ferro/Aço.

Figura 11 - Mecanismo de formação da pelota



Fonte: Adaptado de (Srb & Ruzicková, 1988)

Conforme umectação de uma partícula, um fino filme de água é formado na superfície que, quando em contato com outra partícula úmida, promove uma ligação efetiva entre estes dois filmes. O núcleo da pelota é formado por essas partículas inicialmente unidas e o crescimento da pelota ocorrerá em torno desse núcleo.

O processo encaminha a adesão de mais partículas aos núcleos enquanto estes são rotacionados, gerando esferas. Cabe ressaltar que uma quantidade relevante de ar se mostra presente no interior da pelota e, dessa forma, compromete a resistência mecânica. Entretanto, à medida que os choques entre as partículas se multiplicam, o ar aprisionado é expulso e intensificam-se as forças de ligação.

É necessário que esse processo se desenvolva de modo a garantir as efetivas forças de ligação; só então as pelotas estão aptas a seguir para as etapas subsequentes. Cabe ressaltar que a aglomeração se mantém em função da força de capilaridade resultante da tensão superficial. Essa tensão é fundamentalmente ocasionada pela coesão entre as moléculas do líquido e pela força de adesão entre a superfície do material e o líquido (SRB; RUZICKOVÁ, 1988). A tabela 5 mostra as características dos insumos empregados no processo de pelletização.

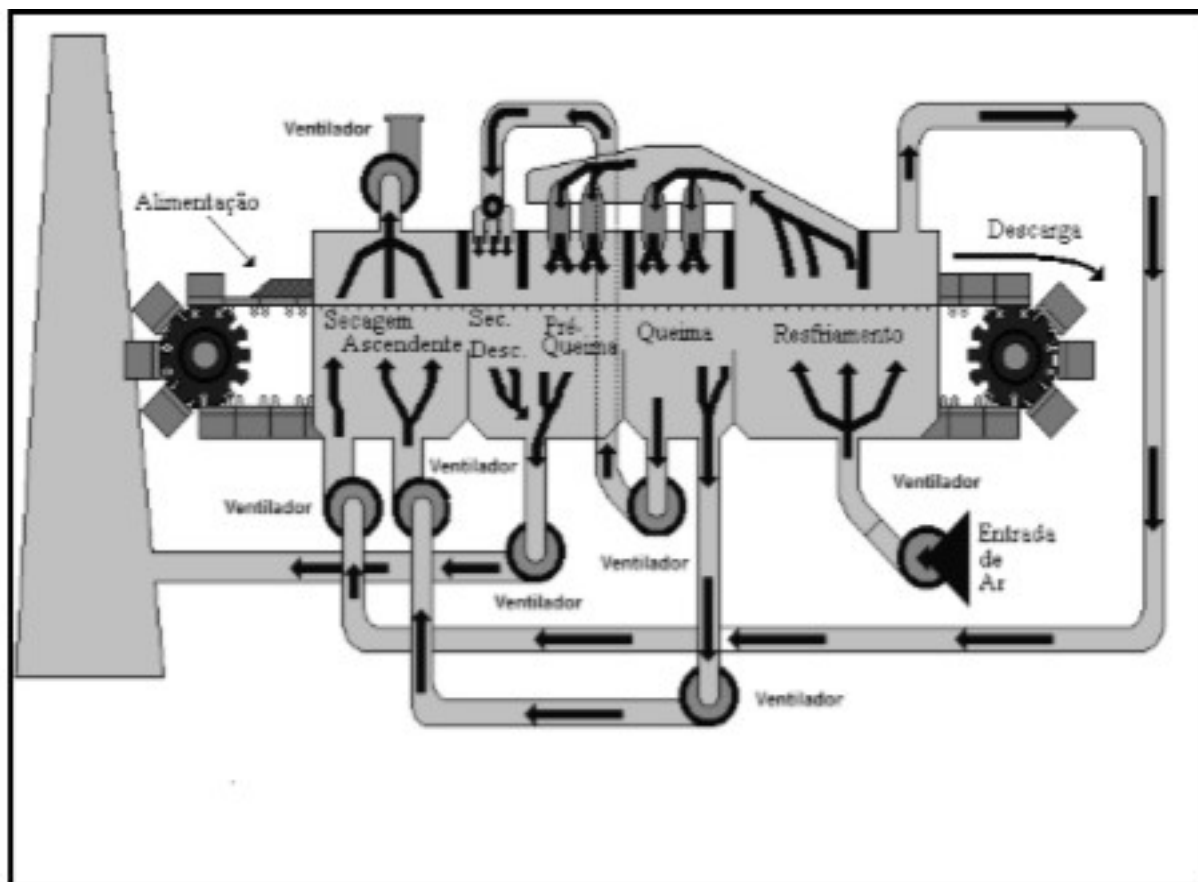
Tabela 3 - Características químicas típicas dos insumos empregados em pelotização.

	Calcário Calcítico	Calcário Dolomítico	Magnesita	Olivina	Carvão	Bentonita
% Fe total	-	-	-	5,14	-	5,4
% SiO ₂	4,0	3,35	6,12	41,76	-	54,0
% Al ₂ O ₃	-	-	-	0,35	-	15,5
% CaO	49,5	37,4	0,67	0,06	-	1,0
% MgO	3,35	17,7	43,52	45,52	-	2,3
PPC (%)	40,83	42,9	45,92	0,53	-	8,7
% Carbono Fixo	-	-	-	-	72,5	-
% Matérias voláteis	-	-	-	-	11,1	-
% Cinzas	-	-	-	-	16,5	-
Poder Calorífico (cal/g)	-	-	-	-	63,08	-

Fonte: CETTEM 2010 Tratamento de Minérios 5ª Edição Parte II

As pelotas formadas no disco têm de manter sua integridade mecânicas no percurso entre a planta de pelotização e o cliente, percurso este que compreende operações de manuseio, transportes, estocagem, carregamento, descargas dos veículos de transportes, pressões e choque térmicos dentro dos reatores de redução para as quais se destina sua fabricação – ferro gusa para alto forno ou ferro esponja para redução direta. Torna-se necessário submeter as pelotas a um tratamento térmico a fim de lhes fornecer a resistência mecânica necessária aos esforços a que serão submetidas, chamados de processo de endurecimento ou processo de queima de pelotas, realizado num forno de queima. A Figura 12 apresenta o desenho esquemático típico de um forno de endurecimento do tipo grelha móvel.

Figura 12 - Forno de Queima ou Endurecimento da Pelota. 17



Fonte: CETTEM 2010 – Tratamento de Minérios 5ª Edição Parte II

2.5.4 Processo de sinterização.

2.5.4.1 Características específicas do processo de sinterização.

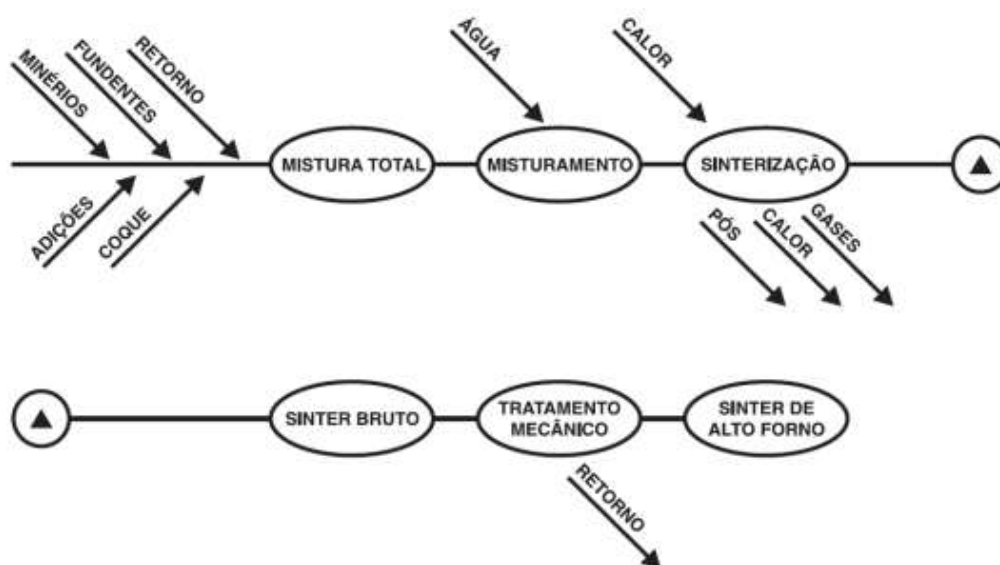
O processo de obtenção da sinterização é conhecido também como de aglomeração a quente e metalurgia do pó. Constitui uma operação de aquecimento de pós finos em condições controladas de temperatura, tempo e atmosfera, produzindo assim corpos sólidos. Determinado material ou mistura de matérias primas, combustível (carvão), fundentes e outros aditivos necessários, com granulometria específica, são submetidos a temperaturas que promovam a difusão atômica na superfície das partículas, de forma a agregá-las na forma de aglomerados de elevada resistência mecânica (BROPHY et al., 1972; REED, 1986; KINGERY et al., 1976; MALAN et al., 2004).

O processo de sinterização normalmente inicia à medida que a temperatura do material excede de 1/2 a 2/3 da temperatura de fusão, ou seja, o suficiente para o

início do processo de difusão atômica para sinterização no estado sólido, ou difusão e fluxo viscoso na presença de uma fase líquida ou produzida por uma reação química.

O processo de sinterização pode também ser representado conforme esquema na Figura 13.

Figura 13 - Esquema representação esquemática do processo de Sinterização



Fonte: Honorato, 2005

A temperatura de sinterização normalmente encontra-se entre 0,8 e 0,9 da temperatura de fusão do material (REED, 1986).

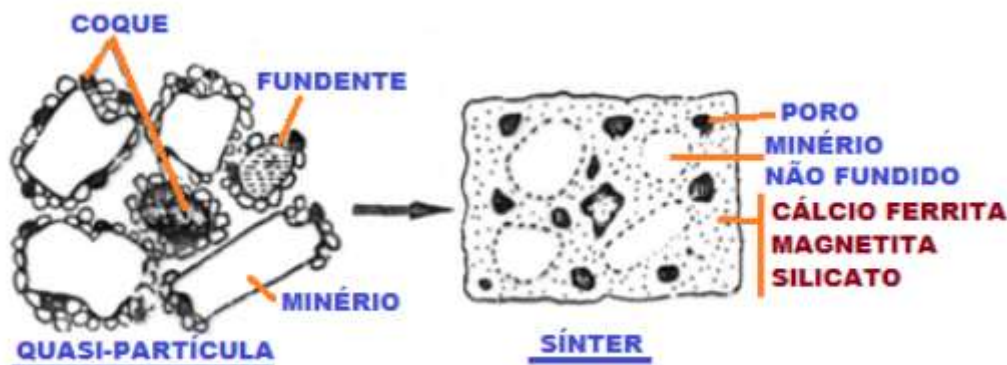
O foco do processo é a criação de nova matéria prima aglomerada, agora denominada de sínter, com dimensões e formas adequadas (CARDOSO, 2016).

Os indicadores imprescindíveis à caracterização do sínter são (HONORATO 2005):

- Garantia da composição química livre de contaminantes;
- Composição química estável;
- Elevado teor de ferro;
- Baixo volume de escória;
- Elevada resistência mecânica;
- Granulometria estável;
- Baixa porcentagem de finos.

O processo de sinterização é demonstrado na Figura 14.

Figura 14 - Processo de sinterização



Fonte: Cardoso, 2016.

2.5.4.2 Fundentes na sinterização.

A definição de fundentes na sinterização é: substâncias que auxiliam no processo de fusão dos metais. Os fundentes são largamente utilizados na separação do minério de ferro da ganga, auxiliando assim na formação da escória. O tipo de fundente usado reflete diretamente na alcalinidade da escória e, portanto, na forma como essa reagirá com as paredes refratárias do forno. A importância dos fundentes pode ser mostrada analisando a quantidade usada na sinterização. Hoje em dia, para a produção de 1000 kg de gusa são utilizados aproximadamente 330 Kg de material fundente. São basicamente responsáveis pela escorificação das impurezas contidas na carga formada por minérios e combustíveis sólidos, o que contribui na formação de uma matriz de escória que promova a coesão dos grãos dos minérios, proporcionando ao sínter resistência adequada à sua utilização no alto forno.

Os fundentes são classificados em duas categorias: básicos, que são aqueles portadores de CaO e/ou MgO ; e os ácidos, que são aqueles portadores de SiO_2 e/ou Al_2O_3 .

De acordo com Machado (2006), os principais fundentes aplicados aos processos com granulometria para sinterização encontrada em torno de 0 a 3mm e de 10 a 30mm são: Calcário (portador de CaO); Cal (portador de CaO); Dunito

(portador de MgO e SiO₂); Serpentinó (portador de MgO e SiO₂); Dolomita (portador de MgO e SiO₂) e Quartzo (portador de SiO₂).

Tipos de sinter existentes:

- Auto fundentes:

Neste caso utiliza-se o acréscimo de fundentes cujos sinter são caracterizados pela relação CaO/SiO₂ denominada basicidade. Quando esta relação é inferior a 1 são descritos como ácidos; e quando essa relação é maior que 1 são denominados básicos.

- Não auto fundentes:

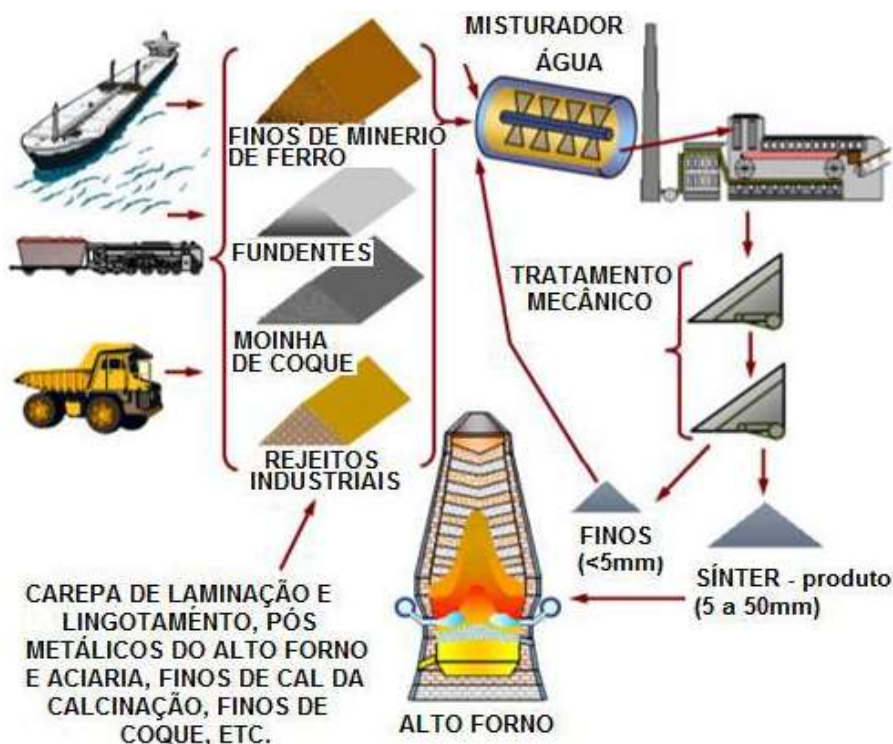
São originários de minério de ferro hematítico ou magnético portando SiO₂ e Al₂O₃, e sem os constituintes CaO e MgO.

Fundentes aplicados aos processos com granulometria para sinterização são encontrados em torno de 0 a 3mm e de 10 a 30mm (MACHADO, 2006).

- Calcário (portador de CaO);
- Cal (portador de CaO);
- Dunito (portador de MgO e SiO₂);
- Serpentinó (portador de MgO e SiO₂);
- Dolomita (portador de MgO e SiO₂);
- Quartzo (portador de SiO₂).

As entradas e saídas no processamento do sinter são demonstradas na Figura 15.

Figura 15 - Entradas e saídas no processamento do sinter.



Fonte: CARDOSO, 2016.

O controle dos parâmetros tempo e temperatura deve ser observado para o bom resultado do processo de sinterização.

Segundo Reed (1986), Kingery et al., (1976) e Brophy (1972), ainda no aquecimento, antes do início da sinterização, podem ocorrer as seguintes transformações: secagem; decomposição de ligantes orgânicos; evaporação de água quimicamente combinada das superfícies das partículas; evaporação de água de cristalização de dentro das fases; pirólise de materiais orgânicos; variação nos estados de oxidação de metais de transição e íons terras-raras; decomposição de carbonatos, sulfatos, etc.; mudança de fase; incorporação de impurezas; reações químicas; oxidação superficial, etc. Estes autores ainda afirmam que a sinterização é função das seguintes condições: tipo de material (composição química, pureza, fases e distribuição de fases), ambiente (presença de líquido e atmosfera), condições de sinterização (temperatura, tempo, taxas de aquecimento e de resfriamento), microestrutura (volume inicial de partículas, tamanho médio de partículas, distribuição granulométrica de partículas, área superficial das partículas, tamanho médio de poros e distribuição de tamanho de poros); sistema (tipo de forno, pressão externa, aditivos,

etc.). De fato, vários fatores podem influenciar no comportamento das partículas durante o processo de sinterização. Contudo durante o processo de sinterização outros fatores podem influenciar o comportamento das partículas, sendo que em certos casos algumas ou todas elas possam ser particularizadas.

Como nem sempre é possível generalizar as particularidades desses materiais, alguns questionamentos sobre o processo de sinterização permanecem sem respostas. (REED, 1986; KINGERY et al., 1976; BROPHY et al., 1972; MALAN et al., 2004).

2.5.4.3 Etapas no processo de sinterização.

A secagem é primeira etapa no processo de sinterização, consistindo na remoção do líquido dos poros de um material. Em um recipiente fechado, um líquido evapora até estabelecer-se uma pressão de equilíbrio acima do líquido. O aumento da temperatura provoca aumento da energia vibratória das moléculas, que migram para a superfície e, devido à pressão de vapor, evaporam. A água livre é eliminada em torno de 100° C, sendo que a eliminação da água quimicamente presente ocorre entre as temperaturas de 100° C e 200° C e a água estrutural a temperaturas mais elevadas. No processo de secagem, geralmente só é eliminada a água livre (REED, 1986; KINGERY et al., 1976).

Após o processo de secagem normalmente inicia a calcinação, em que se eliminam as substâncias voláteis, sendo este processo usado para decomposição dos carbonatos e eliminação de água de hidratação (alumina hidratada, cal hidratada etc.). Por ser um processo mais endotérmico do que a secagem, exige um consumo maior de energia para transformação de carbonatos e hidratos nos seus óxidos correspondentes e a temperaturas mais altas, que variam entre 600 e 800° C. O sentido da reação avança da periferia para o interior da partícula. (REED, 1986; KINGERY et al., 1976; MOURÃO et al., 2007). Podem ocorrer fenômenos secundários no processo de sinterização, que devem ser sempre considerados. Os processos primários, como o crescimento de grãos e a densificação que ocorrem no aquecimento das partículas, são importantes na união das partículas por sinterização das composições cerâmicas. Além desta mudança, existe um grande número de outros possíveis efeitos que se podem citar dentro do processo de sinterização e que

ocorrem com algumas composições particulares, como reações químicas, oxidação, transformações de fase, efeito de gás aprisionado em poros fechados e efeitos de mistura não homogênea; mesmo não sendo processos de importância, frequentemente causam os principais problemas nos produtos sinterizados. Se a temperatura de um produto por alguma razão levar a propriedade mais baixa ou a uma baixa densidade, este produto é considerado super-queimado ou super-sinterizado.

Portanto, existe uma temperatura máxima na qual são obtidas as maiores densidades ou propriedades ótimas. Nas cerâmicas vítreas, a causa mais comum de super-queima é aprisionamento de gases nos poros, causando inchaços ou empolamento. Nos processos siderúrgicos, fases hidratadas, umidades e materiais voláteis nas matérias prima podem provocar a crepitação ou a projeção de banho/escoria, que devem ser evitados. É fundamental que Matérias-primas carregadas em reatores apresentem propriedades de resistência à degradação, redutibilidade e reatividade. A resistência à degradação (geração de partículas finas por abrasão ou ruptura) pode ser avaliada por ensaios de tamboramento, queda a frio e compressão (MOURÃO et al., 2007).

2.5.4.4 Os estágios do processo da sinterização.

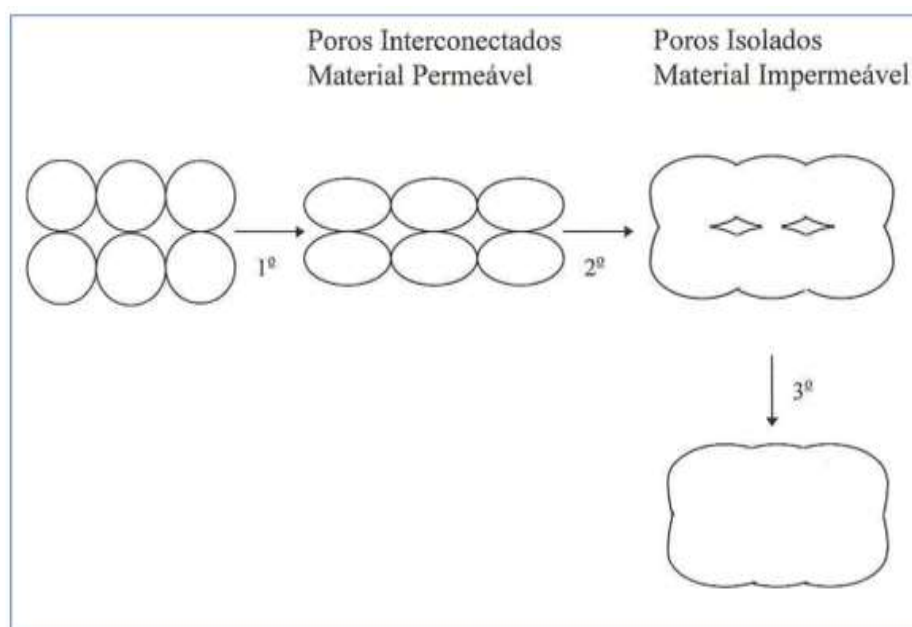
Normalmente o processo de sinterização divide-se em três estágios. Observa-se que a classificação mais usada nas divisões das etapas de sinterização são: estágio inicial, em que o *genus* é máximo; estágio intermediário, em que o *genus* tende a zero; e estágio final, quando o *genus* é praticamente zero. Na descrição dos estágios da cinética de sinterização, os autores encontram uma certa dificuldade e sugerem que o estágio intermediário de sinterização ocorre depois do primeiro estágio com um certo número de poros fechados; e que o estágio intermediário começa durante o crescimento de grãos. O crescimento de grãos pode começar também quando ainda existe uma quantidade apreciável de porosidade. (TING; LIN, 1994).

Com relação ao *genus*, há três estágios de sinterização, conforme mostrado na Figura 16. No primeiro estágio, há o alisamento das partículas, formação de contornos nessas partículas, crescimento de pescoço e arredondamento de poros. No estágio intermediário, há o isolamento dos poros seguido de contração do material, diminuição

da porosidade média e início do crescimento dos grãos. O término do segundo estágio ocorre quando a densidade atinge em torno de 90% de seu valor. No estágio final, aparecem grãos com dimensões maiores, a contração dos poros é baixa e diminui até determinado limite ou mesmo desaparece. (REED, 1986; TING; LIN, 1994; PINHEIRO, 1995).

O genus ou conectividade, que está relacionado com a porosidade do material, é definido como sendo o número máximo de círculos fechados (ou cortes) simultâneos que se podem passar dentro de uma forma geométrica sem que esta seja dividida em duas ou mais partes (DEHOFF, 1968).

Figura 16 - Os três estágios de sinterização segundo Rhines (Dehoff e Rhines).



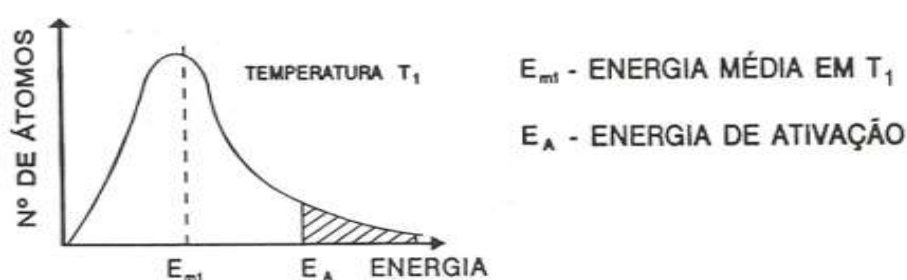
Fonte: Rhines (Dehoff e Rhines.1968)

2.5.4.5 Difusão atômica

O agrupamento de partículas pela diminuição do espaço entre elas no processo de sinterização ocorre por difusão. À temperatura de 0° Kelvin, os átomos nos materiais são considerados estáticos ou em condição mínima de energia; e acima dessa temperatura vibram em busca de sua posição de equilíbrio. Assim, numa rede cristalina, as frequências dessas vibrações não são iguais para um mesmo tipo de átomo, apresentando diferentes níveis de energia, que seguem uma distribuição estatística conhecida como curva de Boltzmann. Ver Figura 17.

Ocorre que, num determinado instante, temos poucos átomos com energia baixa, muitos átomos com energia próxima da média e alguns átomos com energia muito alta. Átomos que num dado instante encontram-se com energia acima da média podem atingir níveis de energia maior que sua energia de ligação com seus vizinhos, o que os faz ocupar uma nova posição, com isso rompendo essas ligações por um processo conhecido em materiais por difusão. A difusão faz com que os átomos migrem para outros locais com lacunas, interstícios, discordâncias, falhas superficiais e volumétricas, diminuindo a energia do sistema. Cabe salientar que a difusão atômica depende da natureza do átomo, estrutura cristalina e temperatura; e, como fenômeno, justifica a união das partículas no processo de sinterização. (BROPHY et al., 1972; KINGERY et al., 1976; REED, 1986; CARAM Jr., 2003; TING; LIN, 1994).

Figura 17 - Distribuição de energia dos átomos de um material para uma temperatura acima de zero Kelvin. Curva de Boltzmann.



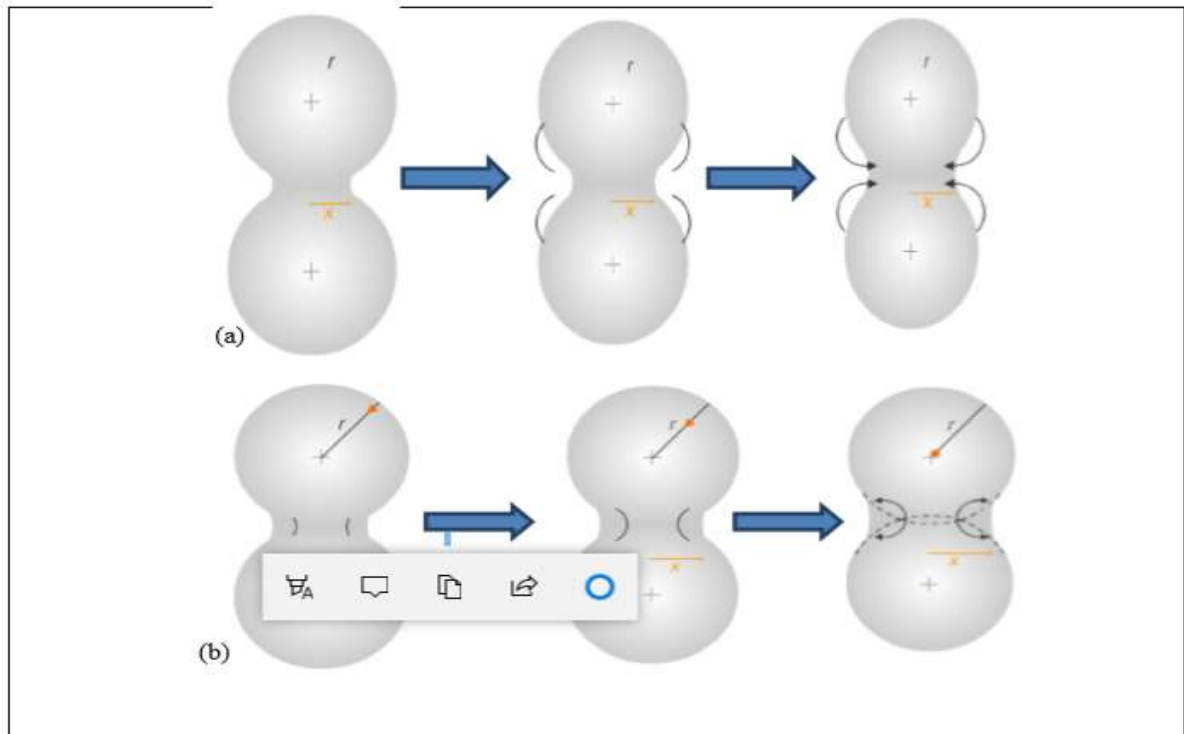
Fonte: (Caram Jr.2003)

Tentativas de explicar a evolução dos processos de sinterização ocorrem com o modelo de J. I. Frenkel (1894-1952), que propõe um modelo para o surgimento e crescimento de um pescoço entre esferas isotrópicas com mesmo raio. Nele, a formação de pescoço por evaporação-condensação na interface sólido-sólido das partículas não causa contração e aproximação dos centros das partículas pelo fato de a matéria ser transportada pelo contorno entre as partículas. Entretanto, na formação de pescoço por transporte de matéria na interface sólido-sólido das partículas, há aproximação dos centros por contração das partículas. Ver Figuras 18 (a) e (b).

A difusão, portanto, é um processo termicamente ativado e ocorre ao longo da superfície, dos contornos de grãos e através do volume dos sólidos. É classificada tradicionalmente em seis formas diferentes de transporte de massa durante a

sinterização no estado sólido. Ver Tabela 6 e Figura 19. Os mecanismos são descritos a seguir. (KINGERY et al., 1976; BROPHY, 1972).

Figura 18 - Formação de pescoço (a) sem contração entre as duas partículas pelo processo de evaporação-condensação, (b) com contração das partículas pela aproximação dos centros.



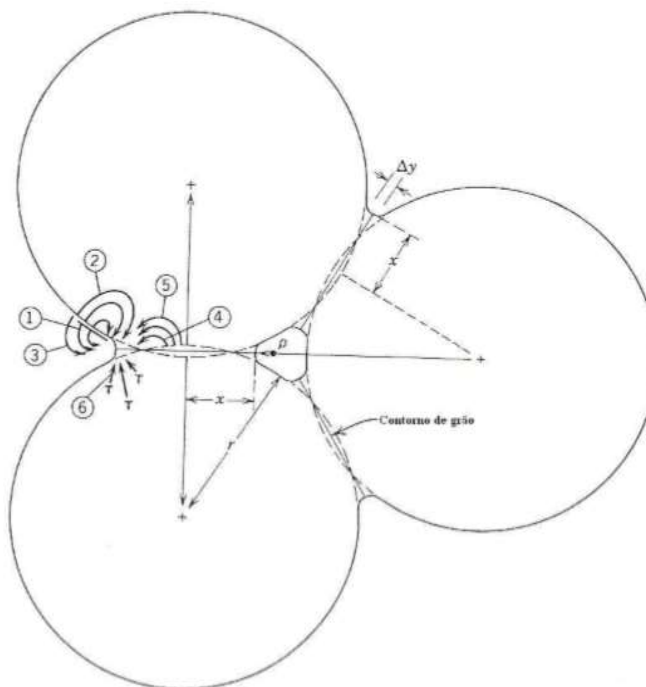
Fonte: Modelo de Frenkel. Fonte: <http://cienciadosmateriais.org> (2012).

Tabela 4 - Caminhos alternativos para transporte de matéria durante os estágios iniciais da sinterização.

Mecanismo	Caminhos de fluxo de átomos	Fonte de massa	Densificação
1	Difusão em superfície	Superfície	Não
2	Difusão volumétrica (rede cristalina)	Superfície	Não
3	Transporte de fase vapor	Superfície	Não
4	Difusão em contorno de grão	Contorno de grão	Sim
5	Difusão volumétrica (rede cristalina)	Contorno de grão	Sim
6	Difusão volumétrica (rede cristalina)	Discordâncias	Sim

Fonte: M.A.Ashby, 1974 apud Kingery et al., 1976

Figura 19 - Caminhos alternativos para transporte de matéria durante os estágios iniciais da sinterização. Ver Tabela 6. Fonte: M. A. Ashby apud (Kingery et al., 1976).



Fonte: M.A.Ashby, 1974 apud (Kingery et al., 1976)

2.5.4.6 Tipos de difusão atômica.

1. Difusão em superfície: a difusão dos átomos ocorre na superfície do material em aquecimento e o menor número de coordenação dos átomos confere maior energia à superfície das partículas. Ou seja, na superfície existe menor número de átomos rodeados na vizinhança comparando-se com o interior da partícula. Com isso, a mobilidade desses átomos é facilitada no aquecimento se comparados com os átomos do interior da partícula; e, como o transporte de massa ocorre na superfície, o tamanho dos poros não é alterado, portanto, não ocorre a densificação.

2. Difusão volumétrica de superfície: os átomos, movendo-se na superfície por difusão volumétrica, requerem uma maior quantidade de energia de ativação para se movimentarem devido à distância entre uma lacuna para a superfície poder ser maior.

3. Difusão por transporte de vapor na superfície: conhecida também por evaporação condensação. O transporte de massa é feito pela diferença de pressão entre as 17 superfícies das partículas (nas superfícies convexas), com formação de áreas menores de pressão vapor no pescoço (superfície côncava). Ocorrendo liberação de componentes voláteis na superfície da partícula, esta pode migrar para uma área com menor pressão, criada por partículas na vizinhança. Não ocorre densificação também.

4. Difusão entre contornos de grãos: a movimentação dos átomos é maior nos contornos de grãos do que no interior da partícula, em função do maior espaço para os átomos se movimentarem. Tal como na difusão superficial, no contorno de grãos o número de coordenação dos átomos é menor do que no interior do reticulado, facilitando a mobilidade atômica em função também da menor quantidade de átomos na vizinhança durante o percurso de um ponto ao outro. Este é um mecanismo de densificação.

5. Difusão volumétrica nos contornos de grãos: a difusão atômica no interior das partículas pode ocorrer também na região dos contornos de grãos por difusão volumétrica para o processo deste transporte de massa, sendo com isso necessária uma maior energia de ativação que, devido ao fechamento de poros, leva também à densificação.

6. Difusão volumétrica por discordâncias lineares: este processo de transporte de massa é também chamado de difusão por defeitos cristalinos. Ocorre no interior das partículas por descontinuidades na fila dos átomos formados durante a cristalização. Como as descontinuidades, possuem energia mais alta do que a fila de átomos empacotados de forma regular. Este tipo de falha contribui para movimentação de átomos em função do menor número de átomos na vizinhança, facilitando o caminho de transporte de um ponto para outro e favorecendo o processo de difusão. Isto constitui também mecanismo de densificação. A redução da energia livre total do sistema ΔGT é reportada como uma força que impulsiona o processo de sinterização.

$$\Delta GT = \Delta Gv + \Delta Gc + \Delta Gs \text{ em que:}$$

ΔGv = energia livre volumétrica;

ΔGc = energia livre de contorno de grão;

ΔGs = energia livre de superfície.

As difusões de superfície e contorno de grãos ocorrem em maior número no processo de sinterização comparados com a difusão volumétrica, pois sistemas em aquecimento estão dispostos a transporte de materiais na superfície, no interior e no leito formado pelas partículas. Elas precisam estar unidas parcialmente para a formação do sinter, formando o pescoço por difusão atômica, conforme figura 18. É sabido que pós muito finos, em geral, são também muito reativos, pois ocupam grandes áreas de superfície. A sinterização de um pó fino consiste na redução de sua superfície e na redução da energia livre total do sistema. (BROPHY et al.,1972; KINGERY et al.,1976; REED, 1986).

Os sistemas utilizados na sinterização dos minérios de ferro são:

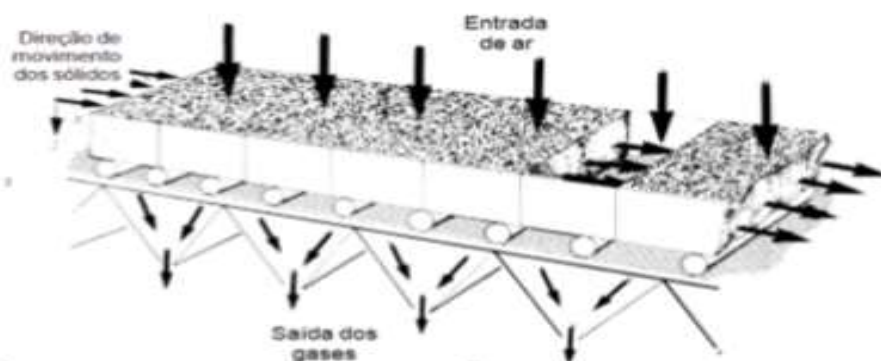
Greenwalt

Produção por bateladas, mais antigo, baixo investimento, pior qualidade do sinter, baixa produtividade (recomendado para pequenas empresas e materiais não ferrosos)

Dwight & Lloyd

Processo contínuo, maior produtividade, maiores investimentos, produção em maior escala.

Figura 20 - Ilustração do processo Dwight & Lloyd Figueira em maior escala.



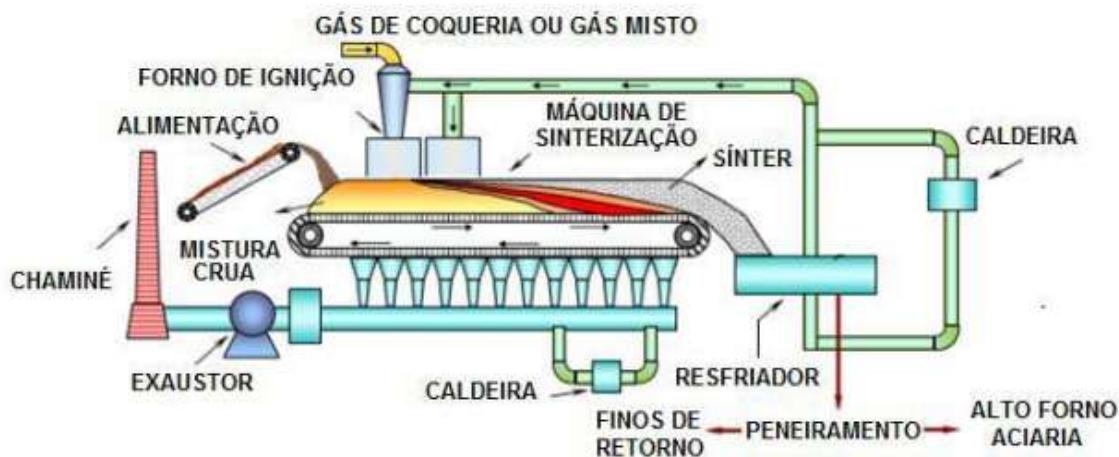
Fonte: Processo Dwight & Lloyd Figueira (2011)

Neste processo, a sinterização obedece a uma sequência de operações feitas na seguinte ordem:

- preparação da mistura minério + combustível sólido + fundente + síter de retorno;
- homogeneização a seco, adição de água;
- homogeneização da mistura, alimentação da mistura;
- colocação de material forramento e carregamento da mistura na esteira.

O material transportado pela esteira passa pelo forno de ignição onde se inicia a reação de sinterização pela ignição do combustível sólido e a sucção do ar feitas pelos ventiladores. O material sinterizado produzido pela máquina de síter com fluxo de queima vertical é conduzido pela esteira para a outra extremidade onde é quebrado por um britador, resfriado e classificado por um sistema de peneiramento como síter para estocagem e síter de retorno (que tem granulometria abaixo da especificada para estocagem), sendo reaproveitado como material de forramento. A homogeneização deste material pode ser feita em um tambor rotativo e o resfriamento do síter utilizando ventiladores. Ver Figuras 20 e 21.

Figura 21 - Esquema do processo Dwight & Lloyd em uma indústria

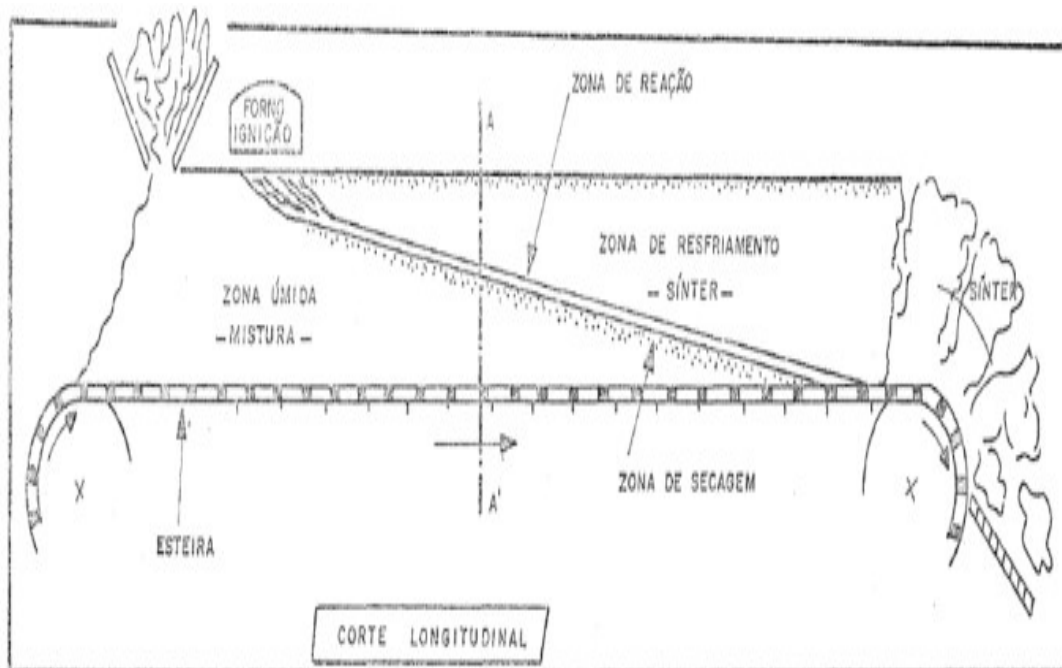


Fonte: CARDOSO, 2016.

O processo de sinterização Dwight & Lloyd pode ser entendido em quatro zonas:

- zona úmida (temperaturas até 100°C);
- zona de secagem: vaporização da umidade;
- zona de reação;
- zona de resfriamento.

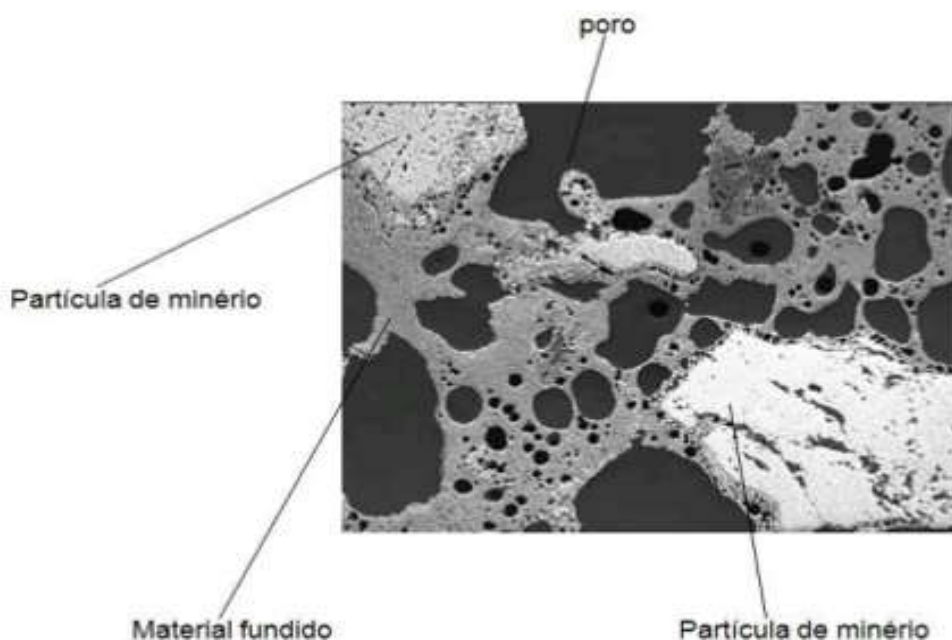
Figura 22 - Zonas do processo de sinterização Dwight & Lloyd.



Fonte: Sinterização Dwight & Lloyd Corte transversal (Figueira *et al.*, 1985)

A microestrutura típica de um sinter de minério de ferro pode ser vista na Figura 23. Mostra a microestrutura típica de um minério de ferro, no qual pode-se observar, além das partículas de minérios, material fundido e poros. Segundo Malan et al., (2004), as características do material de alimentação influenciam na escolha do tipo de instalação requerida para o processo de sinterização.

Figura 23 - Microestrutura do sinter de minério de ferro



Fonte: (Figueira. 2011)

2.5.5 Técnicas de caracterização para minério de ferro

A comercialização de minérios de ferro é realizada a partir da especificação de sua composição química e distribuição granulométrica. Nos últimos anos tem havido um crescente interesse por estudos de caracterização de minérios de ferro que levem em conta outras características, como a composição mineralógica e a microestrutura. Esse tipo de estudo contribui para propiciar melhorias na eficiência dos processos de beneficiamento mineral (ROSIÈRE et al., 1993a). Para o controle de qualidade desses materiais, é fundamental o conhecimento de sua microestrutura, necessitando-se de procedimentos de avaliação qualitativa e quantitativa. A caracterização tecnológica de minerais e análises mineralógicas constitui-se em recursos essenciais na identificação dos constituintes e na determinação de suas propriedades.

Essa etapa é fundamental para o aproveitamento de um recurso mineral de forma otimizada, pois fornece subsídios mineralógicos e texturais necessários à adequada seleção e ao correto dimensionamento de equipamentos a serem usados em uma rota de processo, possibilitando a otimização do rendimento global de uma usina. A caracterização mineralógica de um minério permite identificar e quantificar toda a assembleia mineralógica, definindo quais são os minerais de interesse e de ganga, bem como a distribuição dos elementos úteis. Ela ainda permite definir o tamanho de partícula necessário para liberação dos minerais de interesse dos minerais de ganga, como também identificar e quantificar diversas propriedades físicas e químicas desses minerais, gerando informações potencialmente úteis na definição das rotas de processamento (NEUMANN et al., 2010).

De maneira geral, as técnicas de estudo de caracterização de minérios são inúmeras e de graus de complexidade que variam desde análises granulométricas em peneiras ou análises químicas via úmida até o uso de microscópios eletrônicos avançados e tomógrafos computadorizados. As técnicas atualmente mais empregadas na caracterização são listadas na Tabela 5.

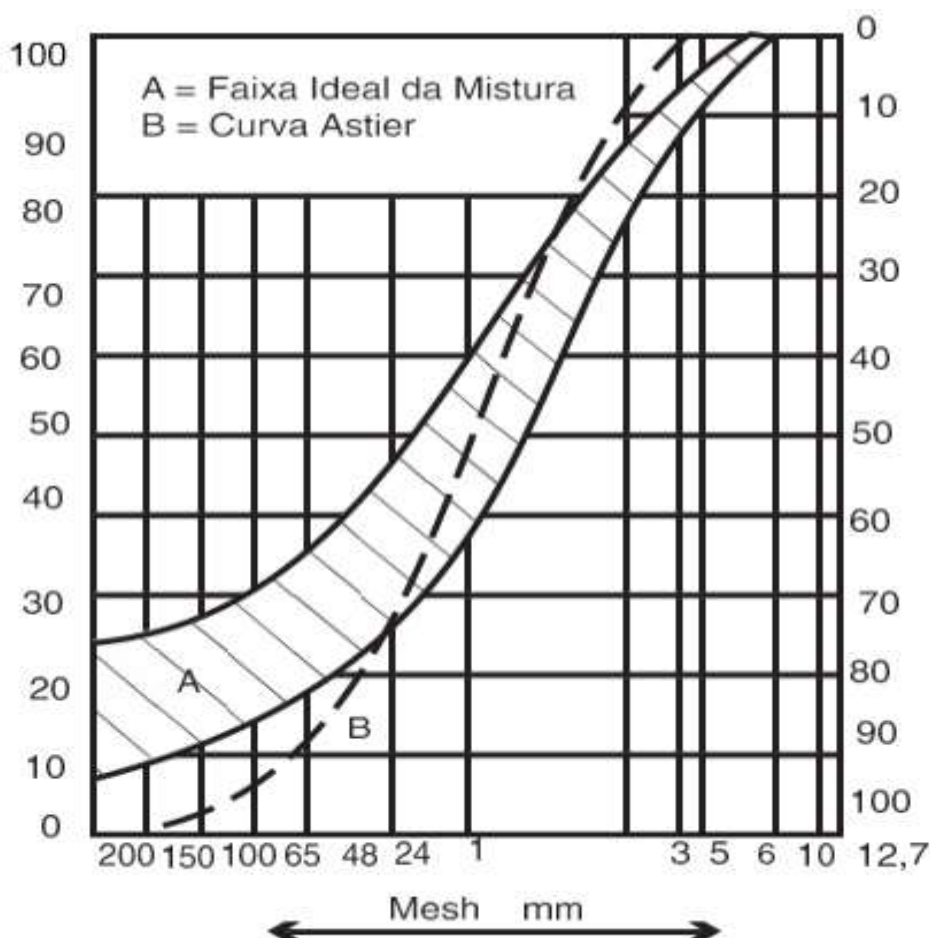
Tabela 5 - Técnicas de mineralogia de uso mais difundido na caracterização de minérios.

Técnica		Propriedades
Microscopia Óptica	Microscópio estereoscópicos microscópios de polarização	Forma, cor, alterações, associações, propriedades ópticas
Difração de Raios X	Método do pó	Caracterização textural, identificação das espécies minerais
Microscopia Eletrônica de Varredura	Microscópio eletrônico de varredura	Forma, associações, liberação
Sistema de Microanálise	Dispersão de energia (EDS) dispersão de comprimento de onda (WDS)	Composição química
Recursos Diversos	Fluorescência de Raios X	Composição química, identificação dos elementos presentes
Tomografia de Raios X	Tomógrafos	Reconstrução tridimensional das partículas, análise de liberação

Fonte: (modificado de Neumann et al., 2010)

A distribuição do minério de ferro no processo de sinterização é granulométrica e é definida pela curva de Astier, na qual determina-se que a granulometria deve ser limitada pelas malhas de 6,35mm e 150mesh (0,150mm) com cerca de 50% do material acima de 1 mm. Isto permite trabalhar com um maior número de minérios e desenvolvimento de técnicas na preparação de misturas para produção de sinter.

Figura 24 - Distribuição granulométrica ideal para a mistura de minérios (curva de Astier)



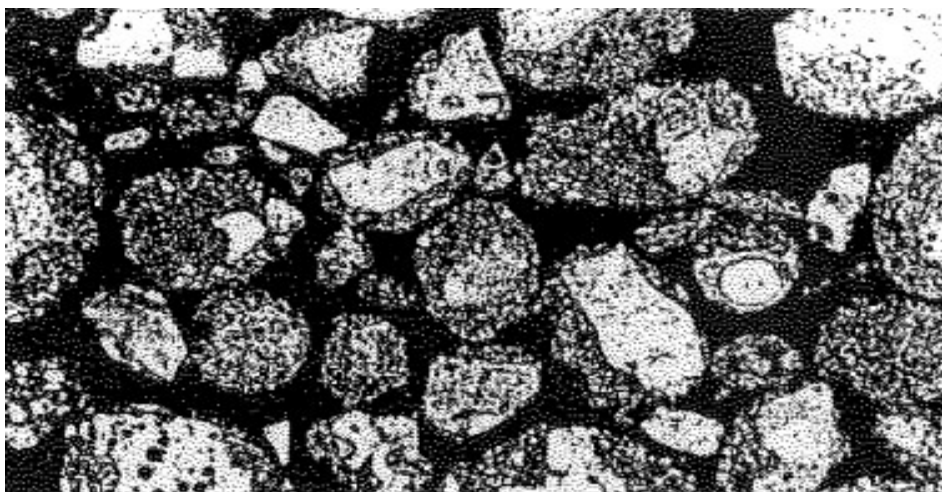
Fonte: Honorato, 2005

Na formação de misturas nos minérios hematíticos, observa-se a presença de ligações entre a produção de sínter e a granulometria dentro dos limites de resistência mecânica do sínter produzido, enquanto nos minérios hidratados essa ligação não é observada, mesmo considerando que a permeabilidade a frio da mistura seja mais elevada para a granulometria.

Poder de Aglomeração a Frio (p.a.f) refere-se por sua capacidade em formar micropelotas ou grânulos em que, pelo processo de umidificação, os finos de minério e os demais constituintes são submetidos a uma etapa de mistura e micropelotização. Na segunda fase, atomiza-se água com intuito de auxiliar na promoção da micropelotização. É uma propriedade interessante nos minérios por inúmeros motivos, entre eles o aumento de produção e a melhor qualidade do produto. A Figura 25

apresenta o aspecto de micropelotas em mistura de sinterização embutida a frio em resina

Figura 25 - Fotomicrografia de micropelotas em mistura a sinterizar resina



Fonte: edilson_pinto_honorato.pdf – Figura 3.10

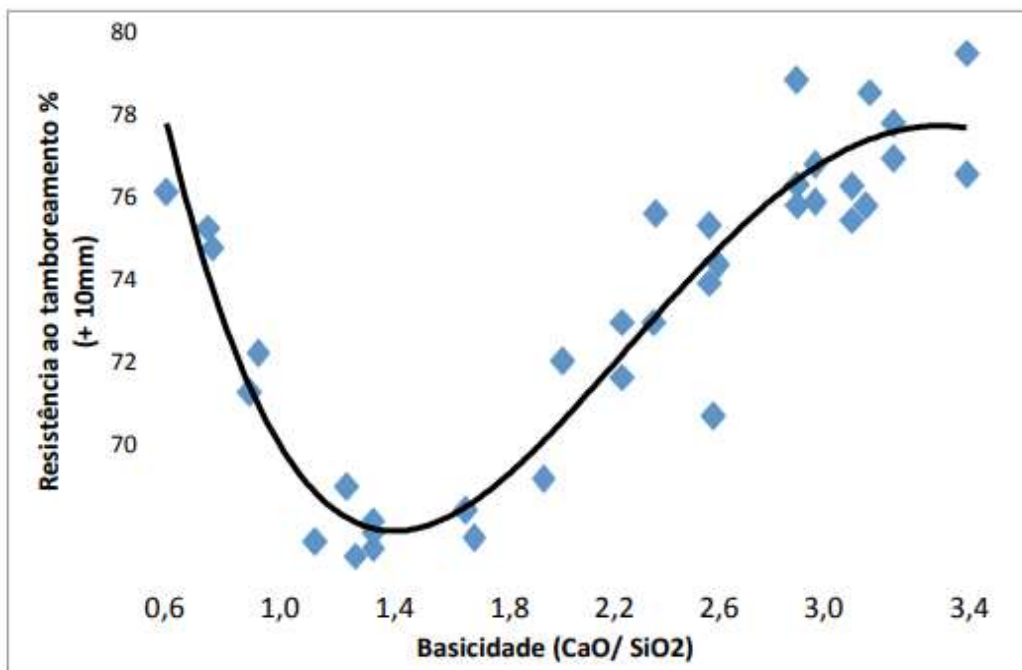
2.5.5.1 Resistência a Frio do Sínter.

A resistência a frio do sínter decorre, de forma primária, da resistência de cada componente mineral, da resistência do agente aglomerante e da composição da base mineral (DAWSAN, 1993). Estudos sobre a tenacidade e a fratura de várias fases minerais encaminharam uma proposição de ordem de queda na resistência designada para o sínter.

A resistência do produto pode também ser afetada de forma relevante a partir da adição de MgO; sua tendência é diminuir com aumento da fração de MgO. A adição de MgO pode afetar de forma significativa a resistência do produto, tendendo a diminuir com o aumento da fração de MgO.

A basicidade do sínter afeta de forma consistente a resistência a frio (Fedorenko, 1970). A variação da resistência a frio foi avaliada com a variação da basicidade entre 0,6 e 3,4. Nos estudos, percebeu-se que, a partir de uma basicidade da carga igual a 0,6, a resistência a frio do sínter reduz à medida do aumento da basicidade, até se atingir um valor mínimo na basicidade de 1,4. A partir deste patamar, a resistência volta a crescer de forma acentuada.

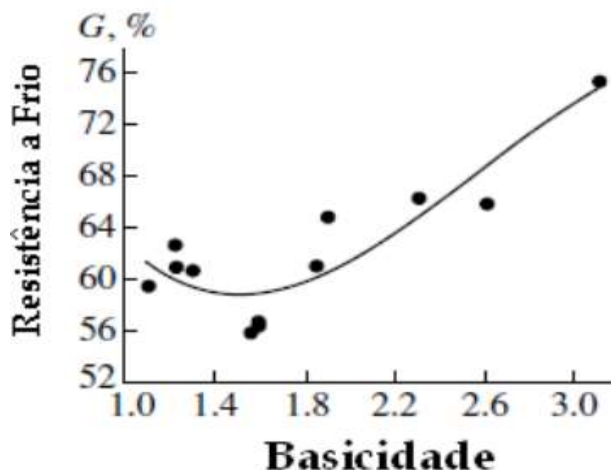
Figura 26 - Influência da basicidade na resistência do sínter



Fonte: FEDORENKO *et al.*, 1970

De outra forma, Malysheva (2007) também avaliou o comportamento peculiar da resistência a frio do sínter, ao se comparar os estudos e o resultado obtido por Fedorenko (1970). Observa-se que os resultados são bastantes semelhantes, entretanto, Malysheva (2007) aponta uma resistência mínima para o sínter no patamar de basicidade de 1,6.

Figura 27 - Influência da basicidade na resistência a frio do sinter 2



Fonte: MALYSHEVA *et al.*, 2007

2.5.5.2 Qualidade do Sinter.

A qualidade do aço fabricado no processo siderúrgico depende diretamente da qualidade química dos produtos, bem como dos processos de fabricação utilizados, sendo o sinter responsável pelo maior percentual de carga de todo o processo – sua qualidade implica diretamente no produto que é o aço.

O minério brasileiro apresenta elevado teor de ferro, enxofre, titânio e álcalis com controle químico dos teores de sílica (SiO_2), fósforo (P) e alumina (Al_2O_3). Os inconvenientes destes elementos são que 100% do fósforo, elemento que fragiliza o aço, vai para o gusa, sendo necessário 1kg C/t de gusa para retirada de 0,1% de fósforo, que tem de ser adicionado minimamente na aciaria. Os álcalis são responsáveis pela formação de cascão nos dutos dos altos fornos e aciarias e o enxofre desclassifica e fragiliza o aço nos pós processados na aciaria. Desta forma, na mistura são encontrados: um tipo de minério predominante adicionado em maiores proporções, denominado minério base; e o minério de adição para correção de composição química, conforme as características física e química esperadas.

Na avaliação da qualidade do produto sinterizado, as propriedades físicas obtidas podem ser verificadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades físicas e químicas do sínter.

Propriedades geométricas das partículas	Tamanho da partícula Distribuição granulométrica Forma da partícula	Estrutura Densidade
Propriedades mecânicas das partículas	Ângulo de repouso Ângulo de atrito interno	Tensão cisalhante Tensão axial
Propriedades químicas das partículas	Contaminação superficial Natureza da fase gasosa Fenômeno de superfície Coesão entre as partículas e adesão à superfície externa	Fenômeno eletrostático Energia Superficial
Propriedades estruturais dos sólidos	Deslocamentos Estrutura cristalina	Granulometria molecular Densidade
Propriedades mecânicas dos sólidos	Tensão cisalhante Tensão axial Resistência à compressão	Limite de escoamento Módulo de elasticidade Dureza
Propriedades químicas dos sólidos	Atrito Composição Impurezas	Tipo de ligação química Método de preparação

Fonte: Adaptado de CETEM, 2004

O foco cada vez maior por melhores desempenhos com menores custos tem impulsionado o desenvolvimento de estudos mais avançados nas diversas áreas e segmentos até então menos explorados. Um dos exemplos destes estudos refere-se ao estudo feito em Altos Fornos na Zona coesiva, dentro dos quais ocorre grande parte da perda de carga, que implica menor permeabilidade. A posição e a espessura da zona coesiva afeta o escoamento gasoso, conseqüentemente a produtividade do alto forno. Este estudo tem objetivo de avaliar a qualidade do sínter na zona coesiva do alto forno através dos parâmetros de amolecimento e fusão da carga metálica, tendo em vista que este material compõe o maior percentual da carga utilizada no alto-forno, portanto contribuindo na melhoria da qualidade final do aço.

Para o processo siderúrgico, um sínter de boa qualidade deve ter acima de 60% de ferro, com mínimo de enxofre e fósforo, resistência mecânica dentro das normas vigentes e resistir a temperaturas elevadas e aos esforços no interior do forno sem amolecer. A qualidade do sínter é usualmente definida pelas propriedades físicas e químicas obtidas, que podem ser verificadas na tabela 7.

Tabela 7 - Características físicas e químicas do sinter.

PROPRIEDADES	CARACTERÍSTICAS	CARACTERÍSTICAS
Geométrica das partículas	Tamanho da partícula Distribuição granulométrica Forma da partícula	Estrutura Densidade
Mecânica das partículas	Ângulo de repouso Ângulo de atrito interno	Tensão cisalhante Tensão axial
Química das partículas	Contaminação superficial Natureza da fase gasosa Fenômeno de superfície Coesão entre as partículas e adesão à superfície externa	Fenômeno eletrostático Energia superficial
Estruturais dos sólidos	Deslocamentos Estrutura cristalina	Granulometria molecular Densidade
Mecânicas dos sólidos	Tensão cisalhante Tensão axial Resistência à compressão	Limite de escoamento Modulo de elasticidade Dureza
Químicas dos sólidos	Atrito Composição Impurezas	Tipo de ligação química Método de preparação

Fonte: Adaptado de CETEM 2004.

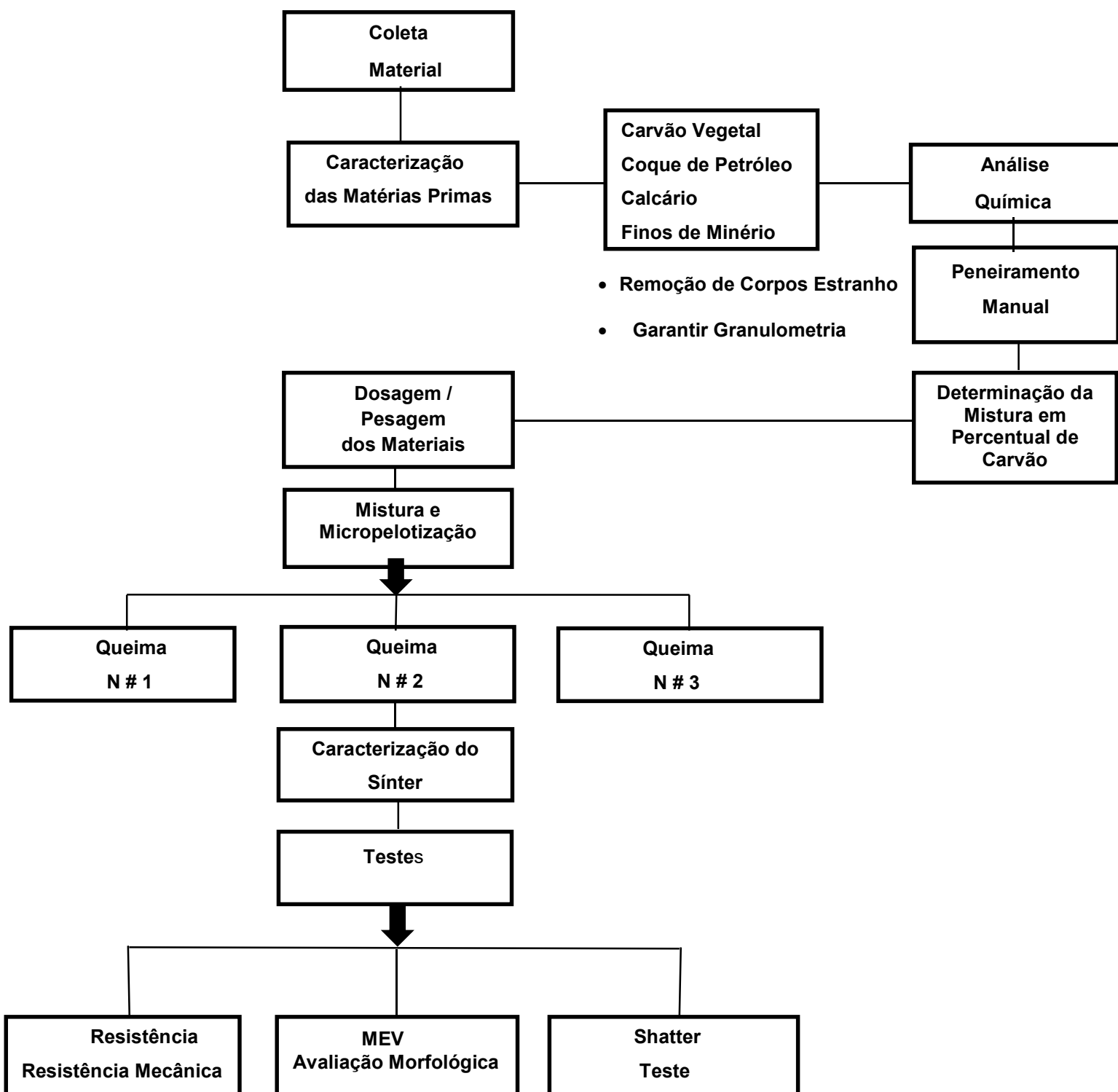
Podemos ainda citar como características de boa qualidade do sinter: a adequada resistência mecânica à abrasão e à queda; porosidade; redutibilidade e granulometria controlada; composição química constante e controlada; e por último o baixo custo de produção com alto rendimento.

A conclusão de um ensaio de Amolecimento e Fusão como referência para o entendimento das oscilações do perfil da Zona Coesiva do alto-forno, relacionadas à qualidade química do sinter e composição da carga metálica para diferentes situações, revelaram coerência com o previsto nas literaturas. Conclui-se que o aumento da basicidade melhora a redutibilidade e a permeabilidade da carga. O posicionamento da zona coesiva foi alterado para uma região mais baixa no alto-forno. E que altos teores de FeO no sinter são prejudiciais à região de amolecimento e fusão, e baixos teores de FeO melhoram a redutibilidade da carga e o desempenho do alto-forno.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão definidas a metodologia utilizada no planejamento, das etapas de obtenção dos materiais de partida, preparação e execução das amostras utilizadas na preparação dos testes, executados numa planta de sinter piloto de propriedade THI Metalúrgica Ltda / ENGEMAQ, localizada em Santa Luzia, MG. Também, está a caracterização química e mecânicas dos produtos resultados deste trabalho no processo de sinterização, a partir das amostras do carvão vegetal e o coque de petróleo. Ver fluxograma da metodologia na Figura 29.

Figura 28 - Fluxograma da metodologia

FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA

Fonte: Autor, 2021

3.1 Materiais

3.1.1 Coleta de Materiais

O material coletado para ser utilizado na preparação das amostras teve como matriz o minério de ferro, massa de moinha de carvão vegetal e coque de petróleo de fornecimento da Mineradora BEMISA, acrescentados insumos visando a uma mistura equilibrada e com uma melhor qualidade química. Foi certificado que os insumos adicionados à mistura dos materiais estavam isentos de contaminação.

Figura 29 - Depósito de recebimento e estocagem de materiais



Fonte: Metalúrgica THI, 2019

Figura 30 - Peneira Granulométrica



Fonte: Metalúrgica THI, 2019

3.1.2 Caracterização dos Materiais de Partida

No processo de caracterização dos materiais e obtenção da mistura, foram acrescentados ao coque de petróleo e ao carvão mineral outras matérias primas tais como Moinha de carvão, Dolomita, Calcário, Finos de retorno, cujas características químicas e físicas estão descritas no quadro 2.

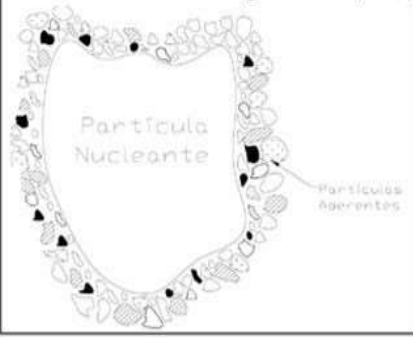
Quadro 1 - Qualidade química dos materiais utilizados

Materia Prima	Fet	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Mn	P	S	K ₂ O	Na ₂ O	PPC	H ₂ O	C
Sinter Feed	65.21	4.09	0.84	0.47	0.81	0.19	0.087				0.54	4.41	
FSD	57.56	5.37	1.26	7.48	1.36	0.193	0.095				0.6		
Dolomita	6.84	5.76	0.21	26.71	17.01	0.46					41.38	4.15	
Calcário	0.05	1.00	0.22	54.48	0.40	0.000	0.0590				43.16	4.73	
Coque de Petróleo	0.46	6.70	3.67	0.55	0.14		0.0236	0.076	0.131	0.067	98.65	8.57	89.30
Moinha de Carvão	0.46	4.90	2.79	0.31	0.07		0.0380				83.92	10.63	62.88
Retomo	57.56	5,37	1.26	7.48	1.36	0.193	0.0950				0.60		

Fonte: Metalúrgica THI, 2019

A descrição dos tipos e características intrínsecas de partículas do sinter feed de minérios de ferro brasileiros estão representadas no Quadro 1.

Quadro 2 - Descrição das partículas de sinter feed dos minérios brasileiros.

Descrição geral dos tipos e das características intrínsecas de partículas do sinter feed de minérios de ferro brasileiros e da estrutura ideal do microaglomerado produzido na etapa de aglomeração a frio (Ishikawa et alii, 1982; Araújo Filho et alii, 1986; Rosière, 1996; Vieira, 1999).			
GRANULOMETRIA IDEAL RETIDA EM % 1-Acima de 9,00mm = 0 2-Entre 6,35 e 9mm, máximo de 5,00% máximo. 45 a 60% DE 20,0 a 45,0% retido Máximo de 20%	↑ 6,3 mm 3,0 mm 1,0 mm ou 0,7 mm 0,3 mm ou 0,2 mm 0,105mm ↓	Partículas do sinter feed	
		Supergrossas Não apresentam a capacidade de aderir as partículas mais finas ao seu redor e não contribuem para o fenômeno de microaglomeração a frio. Devem ser minimizadas na composição da mistura a sinterizar	
		Nucleantes 2 São partículas policristalinas anidras ou hidratadas e não devem participar efetivamente no fenômeno de formação de líquido durante a queima. Deve-se controlar a quantidade de partículas nucleantes goethíticas (altos valores de PPC e de P) de modo a evitar alta contração e formação de grandes trincas no bolo de sinterização e aumento do teor de fósforo no sinter e no gusa.	Estrutura ideal do microaglomerado (a frio)  Tramas das Partículas Nucleantes Granoblástica: Cristais xenomorfos de hematita complexamente intercrescidos (Ex. Minas de Mutuca, C. Feijão, Carajás, etc.) Lepidoblástica: Cristais orientados de hematita ao longo do plano basal (Ex. Minas de Andrade, Cauê, Morro Agudo, etc.) Mosaico: Cristais de bordas retas sem orientação preferencial (Ex. Minas de Casa de Pedra, Cauê, Andrade, etc.) Microgranular: Hematita microcristalina disposta em uma trama granoblástica (Ex. Minas de Carajás e Corumbá). Treliça: Cristais alongados sem orientação preferencial (Ex. Minas de Carajás).
		Nucleantes 1 São os nucleantes ideais, pois são mais efetivos com relação a capacidade de formar a camada aderente. Podem apresentar diferentes tipos de tramas, constituintes mineralógicos, tamanhos de cristais, graus de porosidade e tipos de superfícies. Essas características influenciam os parâmetros de redutibilidade, degradação durante redução e de amolecimento e fusão do sinter. Não devem conter sílica occlusa na sua estrutura ou mesmo na forma liberada.	
		Intermediárias Essas partículas não se comportam nem como nucleantes e nem como aderentes. Devem ser minimizadas na composição da mistura a sinterizar.	Tipologia das Partículas Aderentes e Nucleantes: Espicularíticas (Ex. Minas de Cauê, Andrade, etc.). Martíticas (Ex. Minas de Mutuca, C. Feijão, etc.). Granulares (Ex. Mina do Pico, etc.). Microgranulares (Ex. Minas de Carajás). Magnetíticas (Ex. Mina de C. de Feijão, etc.). Goethíticas (Ex. Minas de Alegria, Capanema, etc.).
		Aderentes São partículas que formam a camada aderente ao redor do núcleo no microaglomerado. Podem apresentar diferentes características mineralógicas de modo a influenciar fortemente os fenômenos de aglomeração a frio e de formação da fase líquida durante a queima e na qualidade intrínseca do sinter formado.	
		Superfinas São partículas de pellet feed. Sua participação no sinter feed deve ser minimizada. Contribuem fortemente para diminuir a permeabilidade do leito a sinterizar. A alumina nessa fração aumenta o RDI (Reduction Degradation Index) do sinter.	

curva de astier

Fonte: Metalúrgica THI, 2019

No relatório de análise realizado para o minério de Baratinha, foram avaliadas 3 (três) amostras contemplando as etapas conforme descritas no Quadro 3.

- Informações gerais sobre as amostras, indicando local e datas da procedência, fornecimento e o relatório para rastreabilidade das amostras, tendo o minério de ferro como matriz;
- Informações sobre análise e resultado das amostras SMP, DUP, STD;
- Método de análise dos elementos das amostras e procedimento de execução;
- Análise granulométrica para as amostras de sinter bem como os resultados;
- Os limites de qualificação.

Quadro 3 - Relatório das Análises

BEMISA	Relatório de Análise												REG. 412		
													REV.00		
													DATA		
Informações Gerais															
Cliente/Projeto	BEMISA - Mina Horto Baratinha			Amostras Recebidas em								08/11/2019			
Nº de Amostras	3			Rastreavel pelo Relatório de Análise Nº								022610/2019			
Matriz	Minério de Ferro														
Informações das Análises															
Tipo	ID Amostras			Resultados											
				Fe	SiO2	Al2O3	P	Mn	MgO	CaO	K2O	Na2O	TiO2	PPC	H2O
SMP	AMOSTRAS PARA SINTER			64,86	4,25	0,84	0,093	0,15	0,86	0,66	0,04	0,30	0,10	0,3	2,00
DUP	AMOSTRAS PARA SINTER			64,46	4,46	0,82	0,104	0,14	0,86	0,64	0,00	0,30	0,11		
STD	MRC 065			66,31	3,52	0,86	0,066	0,28	0,72	0,12	0,04	0,10	0,11		
				65,21	4,09	0,84	0,087	0,19	0,81	0,47				0,30	
Métodos da Análise															
Elementos Fe, SiO2, Al2O3, P, Mn, MgO, CaO, K2O, Na2O, TiO2 Fusão e Leitura em XRF e PPC - Método convencional via Forno Mufla H2O - Secagem em estufa ou chapa															
Análise Granulométrica															
Tipo	ID Amostra			Resultados											
				9,50	6,35	1,00	0,700	0,500	0,150	0,106	<0,104				
DRI	AMOSTRAS PARA SINTER			0,00	1,00	17,45	17,45	17,64	42,25	2,18	1,64				
Legenda															
SMP	Amostras														
DUP	Duplicata Química														
REP	Replicata Química														
STD	Padrão de Acompanhamento														
DRI	Granulometria por peneiramento														
PPC	Calcinação a 1000 ºC por uma hora														
H2O	Determinação da umidade														
Limites de Qualificação															
LD						Fe	SiO2	Al2O3	P	Mn	MgO	CaO	K2O	Na2O	TiO2
						0,01	0,08	0,08	0,080	0,01	0,15	0,01	0,01	0,15	0,01
Mina Horto Baratinha - Estrada de acesso a São Joaquim da Bocaina s/ n] - Fazenda Horto Baratinha - Antônio Dias - MG - CEP 35177-000															

Fonte: Metalúrgica THI, 2019

As operações de aglomeração de minérios destinam-se a conferir às cargas a serem alimentadas no alto forno, constituídas basicamente por minérios de ferro e fundentes (sílica, alumina e cal), um formato adequado e resistência mecânica apropriada ao percurso descendente dessa carga no alto forno com percolação de gases através da carga. Os processos de redução que correm no alto forno não podem ser estritamente classificados como reações gás-sólido, porque podem envolver o surgimento de uma fase líquida (como no caso da sinterização), constituindo assim uma categoria mista à parte, que também envolve fases líquidas.

3.2 Métodos

3.2.1 Granulometria do minério

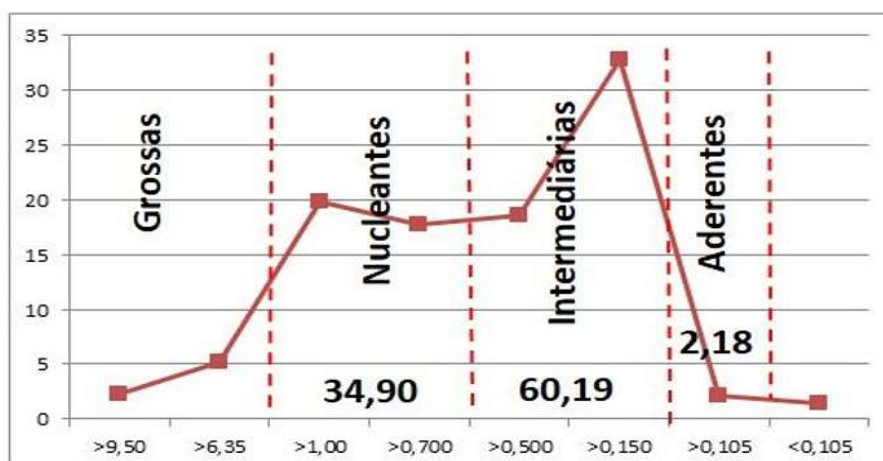
Para avaliação da granulometria foi usado o método de peneiramento, com objetivo de remover possíveis materiais nocivos ao processo e garantir uma granulação adequada aos objetivos de confecção das amostras, variando a malha / material retido, estabelecendo as seguintes classificações super grossas, nucleares, intermediárias, aderentes e superfinas, conforme quadro 3.4 e Fig. 01.

Quadro 4 - Classificação de minérios retidos nos peneiramento

Malha	% Retido	%	Classificação
> 9,50	0	1,09	Super Grossas
> 9,35	1,09		
> 1,00	17,45	34,9	Nucleares
> 0,700	17,45		
> 0,500	17,64	60,19	Intermediárias
> 0,150	42,55		
> 0,105	2,18	2,18	Aderentes
< 0,105	1,64	1,64	Super Finas

Fonte: Metalúrgica THI, 2019

Figura 31 - Representação gráfica da divisão granulométrica dos minérios



Fonte: Metalúrgica THI, 2019

3.2.1.1 Peneiramento

O peneiramento é um processo usado na caracterização dos materiais para separação de partículas sólidas, levando em consideração apenas o tamanho; faz parte da análise granulométrica dos sólidos nas indústrias através de peneiras.

Figura 32 - Área de peneiramento de material



Fonte: THI Metalurgia, 2019

Figura 33 - Modelo de peneira usado no processo de peneiramento de material



Fonte: THI Metalurgia,2019

Figura 34 - Amostras de materiais peneirados



Fonte: THI Metalurgia,2019

Os principais objetivos são:

- Determinar as dimensões das partículas e suas proporções relativas de ocorrência, de forma a se obter o traçado da curva granulométrica de um determinado solo;
- Observar a curva granulométrica, que apresenta intervalos de variação do tamanho das partículas de cada um dos solos, sendo utilizada na classificação textural dos solos;
- Obter valores de diâmetros necessários ao cálculo de parâmetros, como os coeficientes de uniformidade e curvatura do solo.

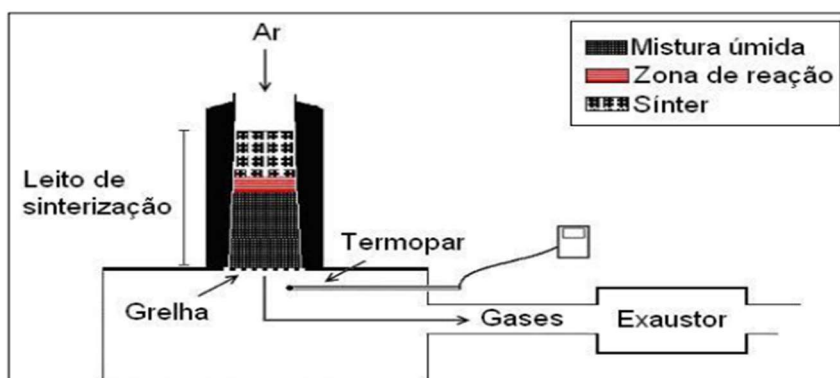
Métodos de Determinação:

Os ensaios para a determinação da granulometria de partículas sólidas são feitos por peneiramento grosso e fino e por processo de sedimentação em água destilada, sendo que o método de peneiramento separa partícula de dimensão até 0,074mm e o método de sedimentação, partículas menores que 0,074mm.

3.2.2 Leito de Fusão

Existem várias configurações de leitos para sinterização, variando de acordo com a necessidade de produção da planta. As taxas de produção podem ser influenciadas pelas variações da dimensão da largura, comprimento e profundidade da cama, ou seja, com o aumento da profundidade do leito, a relação volume / área aumenta, aumentando também finos não sinterizados.

Figura 35 - Configuração de leito para sinterização



Fonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica da USP.

3.2.3 Planta Piloto de Sinterização

Para o trabalho proposto, foi utilizado uma planta de sinter piloto de propriedade THI Metalúrgica Ltda. / ENGEMAQ, localizada em Santa Luzia, MG, projetada para operações de testes de sinterizações, composta de um misturador modelo tambor rotativo, um pelletizador modelo tambor rotativo, panela de sinterização acoplado ao sistema de exaustão, conforme mostrado nas figuras 36, 37 e 38

Figura 36 - Planta piloto de sinterização



Fonte: THI Metalurgia, 2019

Para homogeneização da mistura, é usado normalmente o misturador, que é composto de um tambor rotativo dimensionado conforme taxa de produção prevista para a planta; nele consta um tambor interno fixo similar aos tambores de pelletamento, apoiado sobre roletes ou rolamentos onde estão fixados os elementos misturadores, acoplado ao conjunto moto-redutor com controle de velocidade, conforme figura 38.

Figura 37 - Misturador



Fonte: THI Metalúrgica 2019

A micropelotização é um processo que visa à promoção de micro aglomeração de partículas, adequando sua morfologia para o carregamento da panela ou forno de sinterização. É como o misturador, constituído de um tambor rotativo e sistema de acionamento com possibilidade de variação da inclinação do tambor para ajustar o tempo de permanência dos materiais no interior do tambor, possibilitando ajuste no diâmetro das micropelotas. O processo possui sistema de atomização da água para facilitar a promoção da aglomeração das micropartículas.

Figura 38 - Micropelotizador tipo tambor rotativo.



Fonte: THI Metalúrgica,2019

Durante a passagem do ar pela panela ocorrem reações químicas que conferem à carga as características físico-químicas e metalúrgicas necessárias ao sinter produzido; a passagem do ar retirada por sucção através do sistema de exaustão é responsável pela aglomeração das partículas.

A panela ou forno de sinterização é o local onde se processa a queima da mistura com fixação de tempo de ignição, bem como de outros parâmetros, como abertura do damper, depressão e temperatura. Ver figura 40.

Figura 39 - Panela



Fonte: THI Metalúrgica, 2019

O quadro 5 mostra dados das especificações da panela e do exaustor das Instalações da Sínter Piloto.

Quadro 5 - Especificações da panela e exaustor da planta piloto.

Panela			
	Área Util	0.2352	M²
	Volume da Panela	0.0487	M³
	Capacidade	120	Kg
Exaustor			
	Motor	1870	rpm
		45	Kw
		61	CV
	Vazão	15.558	M³/h
		0.259	M³/minuto
	Depressão	Entrada	- 200 mmCa
		Saída	800 mmCa

Fonte: Autor, 2022

O quadro 3.6 mostra os parâmetros do Sistema de Exaustão com a panela vazia.

Quadro 6 - Parametros do sistema de exaustão

Abertura do Damper	Veloc. m/Seg.	Pressão Dinâmica mmH2O	Flow CFM (M³/Minuto)	Flow CFM (M³/Hora)
0	15	13	130	7800
25	43	115	380	22800
50	48	140	418	25080
75	48	140	422	25320
100	48	140	410	24600

Fonte: Autor, 2022

Tabela 8 - Basicidade do minério de Baratinha

Teste Minério Baratinha	Basicidade 1,4 c / Carvão Vegetal	Basicidade 1,4 c / Coque de Petróleo
--------------------------------	--	---

Fonte: THI Metalúrgica

Quadro 7 - Total de queimas realizadas

TOTAL DE QUEIMAS REALIZADAS.				
Nível	Total	Gerar Retorno	Não Validadas	Validadas
N - 1	5	2		3
N - 2	9	1	5	3
N - 3	8	1	4	3
N - 4	4	1	1	2
N - 5	5	1	1	3
	31			

Fonte: THI Metalúrgica, 2019

3.3 Caracterização Mecânica dos Materiais

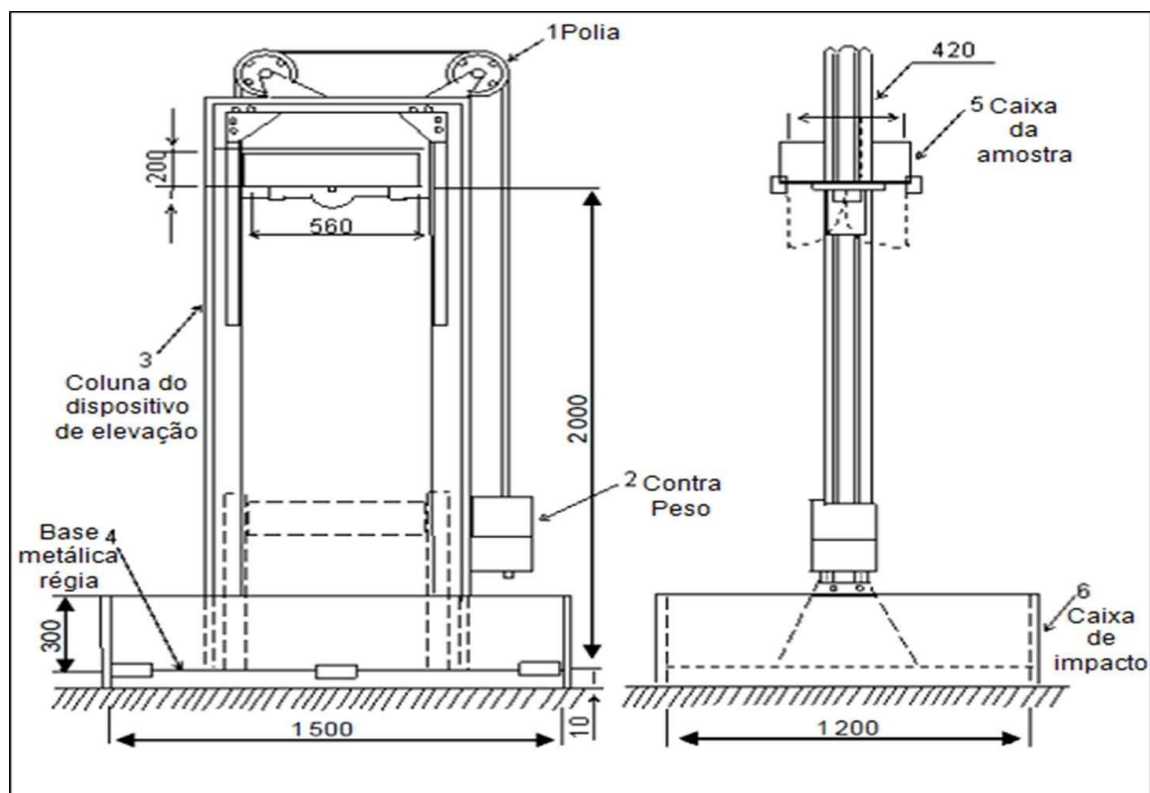
3.3.1 Caracterização do Sínter produzido

3.3.1.1 Shatter Teste

O teste foi realizado nas dependências da empresa Minas Logística, localizada na cidade de Prudente de Moraes – MG, com o objetivo de avaliar a resistência mecânica do sinter produzido. Foi de suma importância, uma vez que o sinter se degrada durante a sua movimentação e a finalidade do teste é medir a susceptibilidade do material em produzir finos.

A realização do teste foi com base na norma ABNT NBR 10633 - Sinter de minério de ferro - Determinação da resistência à queda. Sua finalidade é englobar um dos vários métodos de ensaio que têm sido desenvolvidos para medir diversos parâmetros físicos. Dessa forma, a norma especifica um método para a determinação da resistência à queda de sinters.

Figura 40 - Características do aparelho utilizado no Shatter Test.



Fonte: Adaptado da NBR ABNT 10633

Figura 41 - Shatter Test utilizado para os testes.



Fonte: THI Metalurgia, 2019

3.3.1.2 Caixa da amostra.

A caixa da amostra tem dimensões de 560 mm de comprimento, 420 mm de largura e 2 m de altura, fabricada em aço com alta resistência à abrasão. O fundo é composto por duas chapas, formando uma porta de duas bandeiras, permitindo suas aberturas instantâneas sem perdas de materiais da amostra, com dispositivo de abertura fixado na parte externa.

Figura 42 - Caixa de Amostra



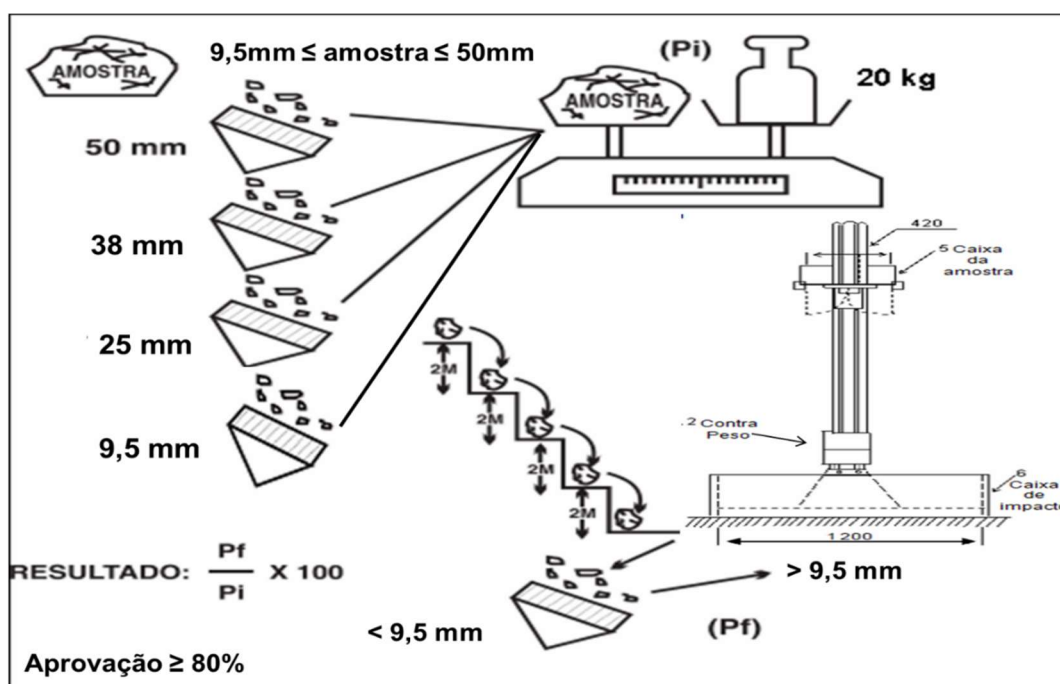
Fonte: THI Metalurgia, 2018

3.3.1.3 Detalhamento da caixa de amostra.

- **Caixa de impacto:** com dimensões de com 1500 mm de comprimento, 1200 mm de largura e 300 mm de altura, confeccionada em chapa metálica rígida, com espessura mínima de 10 mm. Uma das laterais é articulada para possibilitar a retirada de material após cada queda. A base da caixa é substituída quando sua espessura é reduzida em 3 mm, em qualquer ponto de impacto na queda da porção de ensaio;
- **Dispositivo de elevação:** constituído de coluna, polias e contrapeso, para a elevação e o abaixamento da caixa de amostra a uma altura mínima de 2 m, medida entre o fundo da caixa da amostra e a caixa de impacto;
- **Dispositivo de pesagem:** capaz de pesar a massa a ser determinada com uma sensibilidade de 1/1000;
- **Peneiras:** com aberturas quadradas de 50 mm, 38 mm, 25 mm e 9,5 mm, conforme ABNT NBR ISO 3310-1.

Na Figura 43 temos a representação do aparelho utilizado para a realização do Shatter test. Suas principais características foram explanadas acima.

Figura 43 - Apresentação do aparelho utilizado para a realização do Shatter test



Fonte: Duarte, 2017

Na Figura 43 observa-se a descrição das principais etapas para a realização do shatter test, tais como:

- Amostragem, preparação da amostra, porções de ensaio;
- Procedimentos operacionais realizados, tais como:
 - ✓ Separação das amostras como base na norma ABNT NBR ISO 3082, Minérios;
 - ✓ Minérios de ferro;
 - ✓ Preparação de uma amostragem, composta de 80kg de sínter;
 - ✓ Secagem da amostra até a massa constante a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e resfriada até a temperatura ambiente, antes da preparação das porções de ensaio. Vale lembrar que a massa constante é alcançada quando a diferença de massa entre duas medidas subsequentes for menor do que 0,05 % da massa inicial da amostra de ensaio;
 - ✓ Realização de determinação da distribuição granulométrica do material conforme a norma ABNT NBR ISO 4701. Através do peneiramento da amostra de ensaio seca em peneiras com abertura 50 mm, 38 mm, 25 mm e 9,5 mm, sendo desprezado o material com granulometria acima de 50 mm e abaixo de 9,5 mm;
 - ✓ Pesagem de cada fração das amostras obtidas compondo quatro frações de 20 kg;
 - ✓ Identificação de $\pm 0,2\text{ kg}$ cada, entre as granulométricas de 9,5 mm a 50 mm, na mesma proporção da distribuição granulométrica encontrada;
 - ✓ Separação e anotação da massa (Pi) de uma das porções de ensaio de 20 kg, preparadas anteriormente;
 - ✓ Colocação dessa porção de ensaio na caixa de amostra com sua superfície nivelada;
 - ✓ Elevação da caixa a uma altura de 2,0 m;
 - ✓ Abertura do fundo da caixa de forma que toda a porção de ensaio caísse de uma só vez sobre a caixa de impacto;
 - ✓ Recolhimento de todo o material;

- ✓ Repetição dos procedimentos acima por mais três vezes e recolhimento e peneira da porção de ensaio, na peneira de abertura de 9,5 mm, de acordo com a ABNT NBR ISO 4701;
- ✓ O Índice de resistência à queda (IQ) expressa a razão percentual entre a massa da fração retida na peneira de 9,5 mm denominada (P.f.) peso final e a massa inicial (Pi) da porção.
- ✓ O resultado do Shatter test é adequado quando o percentual obtido é maior ou igual a 80%, ou seja, o índice de resistência a queda tem que ser $\geq 80\%$;

Quando o índice de resistência a queda é $\geq 80\%$, o teste deve ser repetido somente duas vezes. Se o índice for $< 80\%$, são necessárias 3 repetições.

3.3.2 Determinação da Mistura padrão % de Carvão

A metodológica proposta neste do trabalho visa à produção e caracterização de sinter de finos de minério de ferro com base magnetítica, utilizando percentuais em massa de moínha de carvão vegetal e coque de petróleo com basicidades no patamar de 1.4, homogeneizadas em misturador intensivo e micro-pelotizadas por queima.

Serão avaliados neste trabalho os parâmetros das queimas N#1 e N#2 considerando a influência de alguns parâmetros na mistura padrão.

Planilhas de acompanhamento dos testes realizados na sinter piloto.

Queima N#1 IB =1,40 (Coque de Petróleo)

Teste # 1

Quadro 8 - Materiais de alimentação do processo da queima N#1- Teste 1.

N # 1	QUEIMA 1				
DATA	26/11/2019				
MATERIAL	Sinter Minério Magnetítico / Coque de Petróleo				
Alimentação Total (Kg)	100				
	Massa Total	Massa Parcial	Peso Seco Kg	Umididade %	Peso Úmido
Matéria Prima	%	%			Kg
Finos de Minério Magnetítico	55,75	7,36	55,75	4,41	58,32
Finos de Sinter Degradado	2,11	10,00	2,11	0,00	7,60
Dolomita	5,60	2,78	5,60	4,15	2,20
Calcário	4,94	7,37	4,94	4,73	5,88
Coque de Petróleo	0,00	6,50	0,00	8,57	5,40
Moinha / Carvão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Retorno	24,00	0,00	24,00	0,00	24,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	100,00	100,00	100,00	Média	103,404
				3,64	
				0,9636	103,781
Umididade Visada (%)	8,84	Então:	0,9116		
Umididade Real (%)	6,97			Mistura Total Úmida	103,697
Água a ser Adicionada	6,293				
	0,200	Perda na Betoneira			
	6,493				
		Água a ser Adicionada			
	9,90	==> % de água na MT			
		Retorno + FSD			
		31,600	> 5 MM = 15%	4,740	
			> 5 MM = 85%	26,860	

Fonte: THI Metalurgia 2019

Quadro 9 - Dados do processo da queima N#1- Teste 1

DADOS DO PROCESSO		
Altura da Camada Total	mm	480
Altura da Camada de Bedding	mm	35
Altura da Camada de Bedding	Kg	9,000
Altura da Borda	mm	230
Altura da Camada de Mistura	mm	215
Volume de Água Adicionada	Kg	6,493
% Água na M. Total	%	6,49
Tempo de Misturamento	Minutos	5,00
Tempo de Micropelotização	Minutos	8,00
	Total	13,00
Moinha para Ignição	Kg	0,800
Tempo de Ignição	Segundos	1,50
Mistura Total Carregada	Kg	109,520
Produtividade	ton./m³/Dia	13,45

Fonte: THI Metalurgia 2019

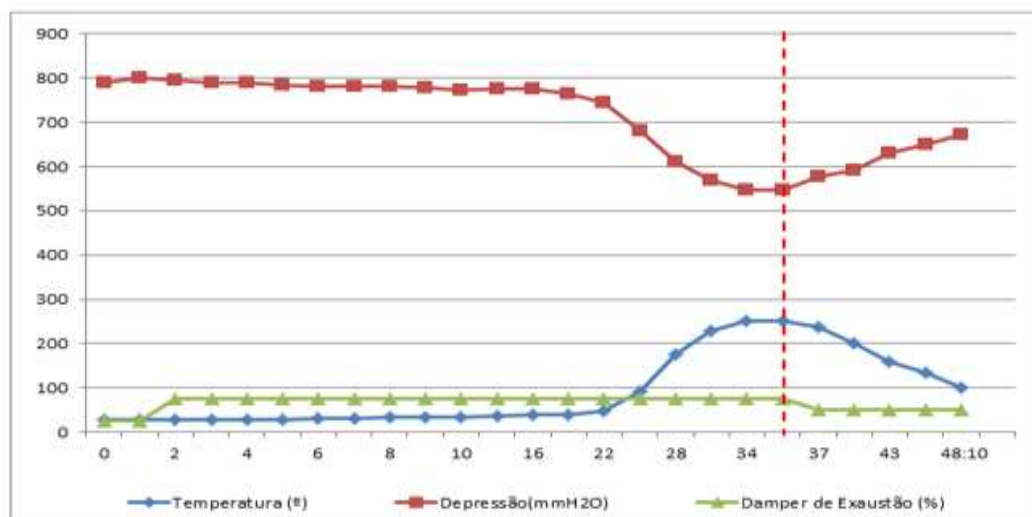
No processo de execução da Queima N#1, foram destacados os parâmetros de evolução do tempo de queima da mistura em minutos, abertura do damper de exaustão (%), temperatura (°), Depressão em (mmH₂O), em que se observa que o pico do tempo é de 34,44 min, a abertura do damper é 75%, a temperatura foi de 250°, e a depressão foi de 548 mm H₂O, conforme mostrado no quadro 7 e gráfico 1.

Quadro 10 - Resultados da queima # 1- Teste 1

Evolução (Minuto)		Damper de Exaustão (%)	Temperatura (%)	Depressão (H2O)
	0	25	27	790
	1	25	27	801
	2	75	27	795
	3	75	27	790
	4	75	27	790
	5	75	27	783
	6	75	30	781
	7	75	31	780
	8	75	33	780
	9	75	34	779
	10	75	35	773
	13	75	37	775
	16	75	38	776
	19	75	40	764
	22	75	47	745
	25	75	92	680
	28	75	176	612
	31	75	229	568
	34	75	250	548
(PICO)	34,44	75	250	548
	37	50	237	577
	40	50	200	592
	43	50	160	630
	46	50	134	650
	48:10	50	100	672

Fonte: THI Metalurgia 2019

Gráfico 1 - Resultados da Queima # 1-Teste 1



Granulometria		
mm	Peso	%
>50	19,800	20,50
>25	22,100	22,88
>12	23,150	23,96
>5	11,600	12,01
<5	19,950	20,65
	96,600	100,00

Rendimentos:		%
SP/SP+Retorno		75,55
SP/M.total		71,63
SP/M.Parcial		94,25

Balanco	98,13
---------	-------

Sinter produto Kg	72,982
-------------------	--------

Fonte: THI Metalurgia 2019

Quadro 12 - Dados do processo da queima N#1 – Teste 2

DADOS DO PROCESSO		
Altura da Camada Total	mm	480
Altura da Camada de Bedding	mm	35
Altura da Camada de Bedding	Kg	9,000
Altura da Borda	mm	235
Altura da Camada de Mistura	mm	210
Volume de Água Adicionada	Kg	5,314
% Água na M. Total	%	5,31
Tempo de Misturamento	Minutos	5,00
Tempo de Micropelotização	Minutos	8,00
	Total	13,00
Moinha para Ignição	Kg	0,800
Tempo de Ignição	Segundos	1,73
Mistura Total Carregada	Kg	108,520
Produtividade	ton./m ³ /Dia	16,71

Fonte: THI Metalurgia 2019

No processo de execução da Queima N#1 foram destacados os parâmetros de evolução do tempo de queima da mistura em minutos, abertura do damper de exaustão (%), temperatura (°), depressão em (mmH₂O), em que se observa que o pico do tempo é de 31,53 min, a abertura do damper é 75%, a temperatura foi de 288 °C, e a depressão foi de 547 mm H₂O, conforme mostrado no quadro 9 e gráfico 1.

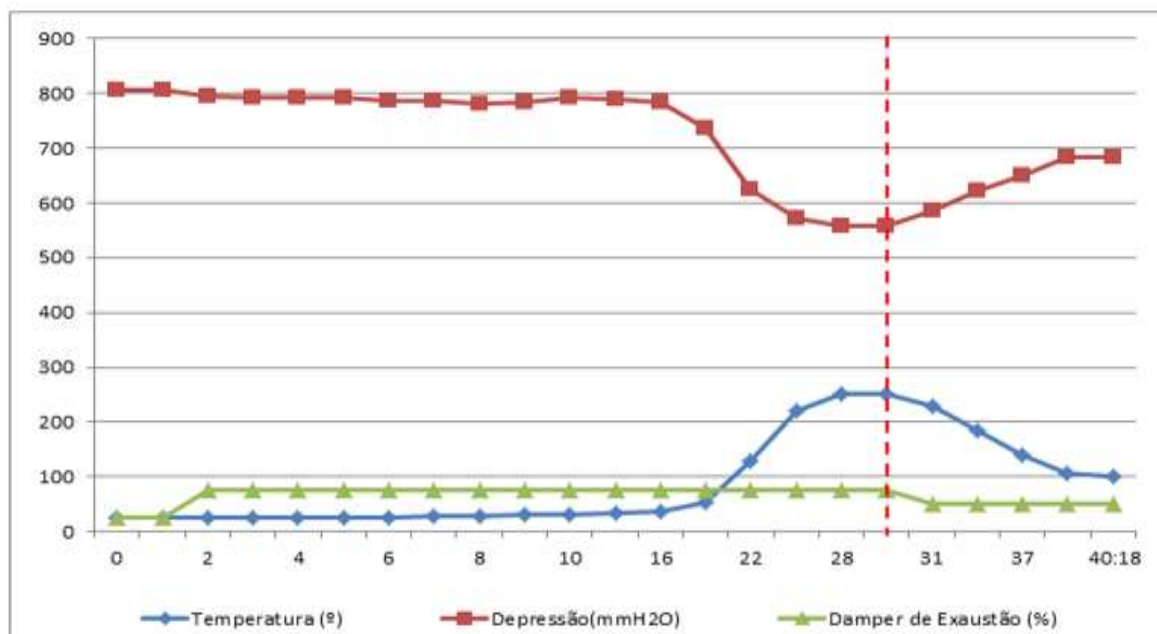
Quadro 13 - Resultados da queima # 1 – Teste 2

Evolução (Minuto)		Damper de Exaustão (%)	Temperatura (%)	Depressão (H2O)
	0	25	26	805
	1	25	26	805
	2	75	26	812
	3	75	26	808
	4	75	26	801
	5	75	27	790
	6	75	29	792
	7	75	30	798
	8	75	31	793
	9	75	32	791
	10	75	33	791
	13	75	35	790
	16	75	36	786
	19	75	38	776
	22	75	42	753
	25	75	103	664
	28	75	250	547
	31	75	287	533
(PICO)	31,53	75	280	547
	34	50	256	574
	37	50	228	580
	40	50	181	612
	43	50	145	638
	46	50	115	664
	47,25	50	100	673

Qu

Fonte: THI Metalurgia 2019

Gráfico 2 - Resultados da queima # 1 – Teste 2



Granulometria		
mm	Peso	%
>50	4,350	4,41
>25	29,000	29,43
>12	28,800	29,22
>5	14,850	15,07
<5	21,550	21,87
	98,550	100,00

Rendimentos:	%
SP/SP+Retorno	74,43
SP/M.total	72,31
SP/M.Parcial	95,15

Balanço	104,79
---------	--------

Sinter produto Kg	73,348
-------------------	--------

Fonte: THI Metalurgia 2019

Teste # 3

Quadro 14 - Materiais de alimentação da queima N#1 – Teste 3

N # 1	QUEIMA 3				
DATA	26/11/2019				
MATERIAL	Sinter Minério Magnetítico/ Coque de Petróleo				
Alimentação Total (Kg)	100				
	Massa Total %	Massa Parcial %	Peso Seco Kg	Umidade %	Peso Úmido Kg
Matéria Prima					
Finos de Minério Magnetítico	55,75	73,36	55,75	4,41	58,322
Finos de Sinter Degradado	7,6	10,00	7,60	0	7,600
Dolomita	2,11	2,78	2,11	4,15	2,201
Calcário	5,6	7,37	5,60	4,73	5,878
Coque de Petróleo	4,94	6,50	4,94	8,57	5,403
Moinha / Carvão	0	0	0		0
Retorno	24	0	24,00	0	24,000
0	0	0	0		0
Total	100	100	100,00	Média 3,64	103,404
				0,9636	103,781
Umidade Visada (%)	7,85	Então:	0,9215		
Umidade Real (%)	6,45	Mistura Total Úmida			108,519
Água a ser Adicionada	5,114				
	0,2	Perda na Betoneira			
	5,314				
		Água a ser Adicionada			
	8,72	==> % de água na MT			
			Retorno + FSD		
			31,6	> 5 MM = 15%	4,74
				> 5 MM = 85%	26,86

Fonte: THI Metalurgia 2019

Quadro 15 - Dados do processo da queima # 1 – Teste 3

DADOS DO PROCESSO		
Altura da Camada Total	mm	480
Altura da Camada de Bedding	mm	35
Altura da Camada de Bedding	Kg	9,000
Altura da Borda	mm	225
Altura da Camada de Mistura	mm	220
Volume de Água Adicionada	Kg	5,314
% Água na M. Total	%	5,31
Tempo de Misturamento	Minutos	5,00
Tempo de Micropelotização	Minutos	8,00
	Total	13,00
Moinha para Ignição	Kg	0,8
Tempo de Ignição	Segundos	1,52
Mistura Total Carregada	Kg	108,85
Produtividade	ton./m ³ /Dia	14,34

Fonte: THI Metalurgia 2019

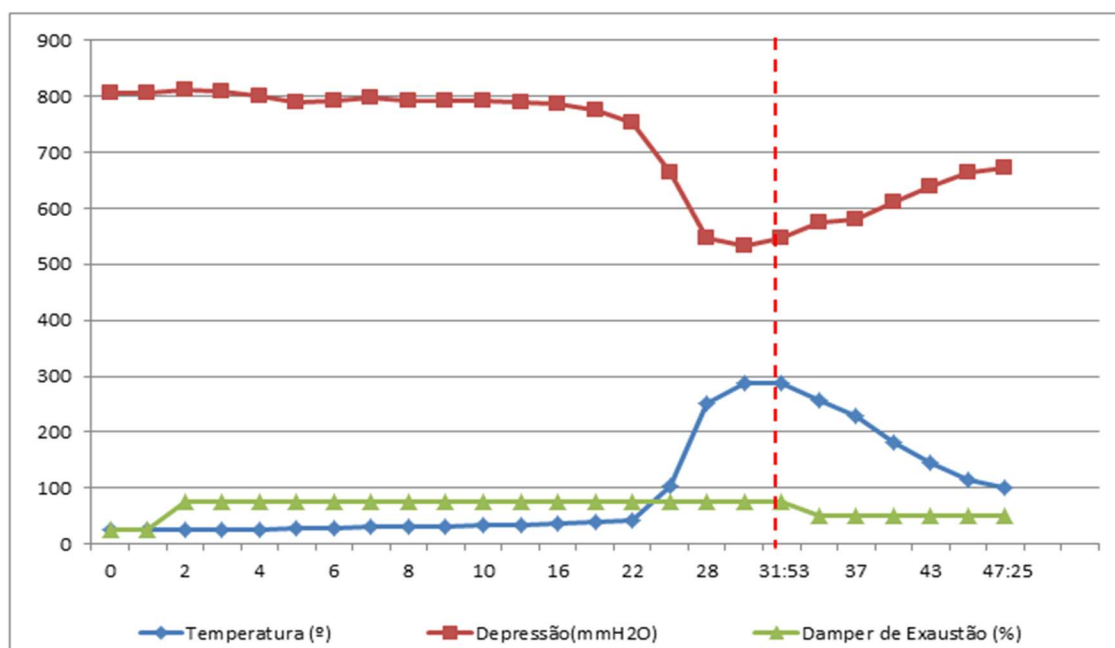
No processo de execução da Queima N#1 teste 3, foram destacados os parâmetros de evolução do tempo de queima da mistura em minutos, abertura do damper de exaustão (%), temperatura (°), depressão em (mmH₂O), em que se observa que o pico do tempo é de 28,37 min, a abertura do damper é 75%, a temperatura foi de 251 °C, e a depressão foi de 558 mm H₂O, conforme mostrado no quadro 7 e gráfico 1.

Quadro 16 - Resultados da queima # 1 – Teste 3

Evolução (Minuto)		Damper de Exaustão (%)	Temperatura (%)	Depressão (H2O)
	0	25	26	805
	1	25	26	805
	2	75	26	812
	3	75	26	808
	4	75	26	801
	5	75	27	790
	6	75	29	792
	7	75	30	798
	8	75	31	793
	9	75	32	791
	10	75	33	791
	13	75	35	790
	16	75	36	786
	19	75	38	776
	22	75	42	753
	25	75	103	664
	28	75	250	547
	31	75	287	533
(PICO)	31,53	75	238	547
	34	50	256	574
	37	50	228	580
	40	50	181	612
	43	50	145	638
	46	50	115	664
	47,25	50	100	673

Fonte: THI Metalurgia 2019

Gráfico 3 - Resultados da queima # 1 – Teste 3



Granulometria		
mm	Peso	%
>50	12,100	12,54
>25	20,050	20,78
>12	29,550	30,62
>5	13,100	13,58
<5	21,700	22,49
	96,500	100,00

Rendimentos:	%
SP/SP+Retorno	73,71
SP/M.total	69,86
SP/M.Parcial	91,92

Balanço	105,42
---------	--------

Sinter produto Kg	71,13 4
-------------------	---------

Fonte: THI Metalurgia 2019

Queima N#1 IB =1,40 - (Coque de Petróleo)

Na queima N#2 foram mantidos os parâmetros para composição das amostras, bem como metodologia e os procedimentos de execução dos testes. Contudo, foram verificadas variações nos resultados em termos qualitativos e quantitativos, conforme pode ser visto no quadro 12 e gráfico 2.

Teste 6

Quadro 17 – Materiais de alimentação da queima # 2 – Teste 6

N # 2	TESTE - 6				
DATA	26/11/2019				
MATERIAL	Sinter Minério Magnetítico / Moinha de Carvão				IB=1,40
Alimentação Total (Kg)	100				
	Massa Total %	Massa Parcial %	Peso Seco Kg	Umidade %	Peso Úmido Kg
Matéria Prima					
Finos de Minério Magnetítico	38,10	61,45	38,10	4,41	39,86
Finos de Sinter Degradado	6,20	10,00	6,20	0,00	6,20
Dolomita	1,61	2,60	1,61	4,15	1,68
Calcário	4,57	7,37	4,57	4,73	4,80
Coque de Petróleo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Moinha / Carvão	11,52	18,58	11,52	10,63	12,89
Retorno	38,00	0,00	38,00	0,00	38,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	100,00	100	100	Média 3,99	103,425
					0,9601
Umidade Visada (%)	13,50	Então:	0,8650		
Umidade Real (%)	12,77		Mistura Total Úmida	115,607	
Água a ser Adicionada	12,182				
	0,200	Perda na Betoneira			
	12,382				
		Água a ser Adicionada			
	15,81	==> % de água na MT			
		Retorno + FSD			
		44,200	> 5 MM = 15%	6,630	
			> 5 MM = 85%	37,570	

Fonte: THI Metalurgia 2019

Quadro 18 - Dados do processo da queima # 2 – Teste 6

DADOS DO PROCESSO		
Altura da Camada Total	mm	480
Altura da Camada de Bedding	mm	35
Altura da Camada de Bedding	Kg	9,000
Altura da Borda	mm	120
Altura da Camada de Mistura	mm	325
Volume de Água Adicionada	Kg	12,382
% Água na M. Total	%	15,81
Tempo de Misturamento	Minutos	5,00
Tempo de Micropelotização	Minutos	8,00
	Total	13,00
Moinha para Ignição	Kg	0,800
Tempo de Ignição	Segundos	1,77
Mistura Total Carregada	Kg	114,000
Produtividade	ton./m ³ /Dia	14,34

Fonte: THI Metalurgia 2019

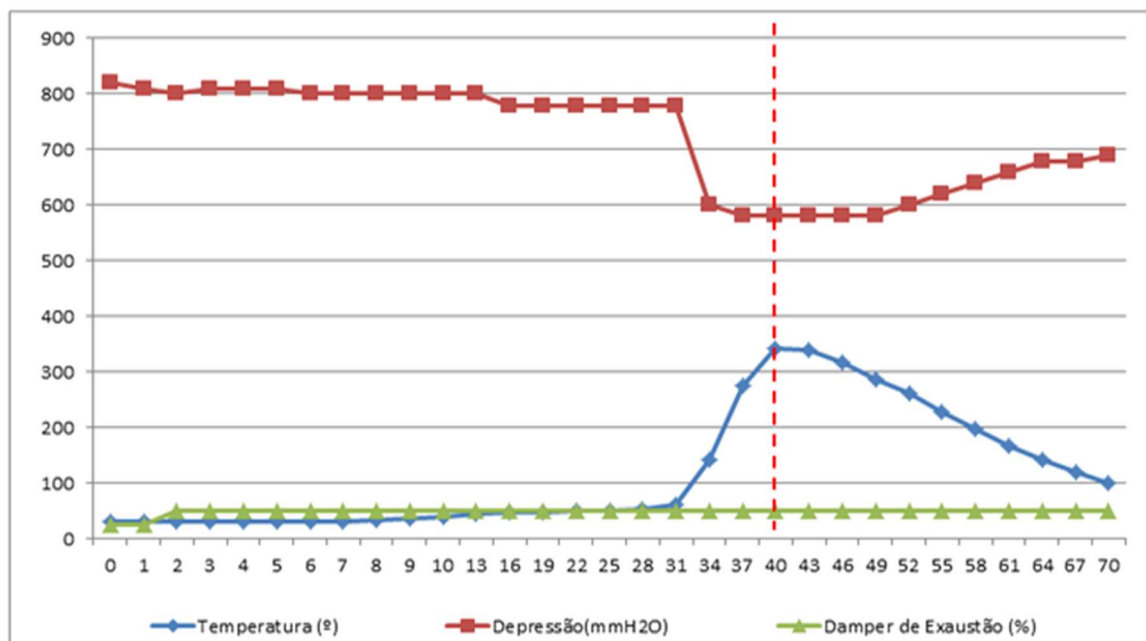
Evolução dos parâmetros no processo de queima N#2: tempo de queima foi de 40,00 min, a abertura do damper é 50 %, a temperatura foi de 343 °C e a depressão foi de 580 mm H₂O, conforme mostrado no quadro 12 e gráfico 4.

Quadro 19 - Resultados da queima # 2 – Teste 6

Evolução (Minuto)		Damper de Exaustão (%)	Temperatura (%)	Depressão (H2O)
	0	25	26	805
	1	25	26	805
	2	50	26	812
	3	50	26	808
	4	50	26	801
	5	50	27	790
	6	50	29	792
	7	50	30	798
	8	50	31	793
	9	50	32	791
	10	50	33	791
	13	50	35	790
	16	50	36	786
	19	50	38	776
	22	50	42	753
	25	50	103	664
	28	50	250	547
	31	50	287	533
	34	50	256	574
	37	50	228	580
(PICO)	40	50	343	580
	43	50	338	580
	46	50	317	580
	49	50	287	580
	52	50	260	600
	55	50	229	620
	58	50	197	640
	61	50	166	660
	64	50	143	680
	67	50	119	680
	70	50	100	690

Fonte: THI Metalurgia 2019

Gráfico 4 - Resultados da Queima # 2 – Teste 6



Granulometria		
mm	Peso	%
>50	5,700	6,08
>25	9,850	10,50
>10	17,600	18,76
>5	24,100	25,69
<5	36,550	38,97
	93,800	100,00

Rendimentos:		%
SP/SP+Retorno		54,99
SP/M.total		51,87
SP/M.Parcial		83,66

Balanço	111,18
---------	--------

Sinter produto Kg	51,582
-------------------	--------

Fonte: THI Metalurgia 2019

Teste 7

Quadro 20 – Materiais de alimentação da queima # 2 – Teste 7

N # 2	TESTE - 7				
DATA	26/11/2019				
MATERIAL	Sinter Minério Magnetítico / Moinha de Carvão				
Alimentação Total (Kg)	100				
	Massa Total %	Massa Parcial %	Peso Seco Kg	Umidade %	Peso Úmido Kg
Matéria Prima					
Finos de Minério Magnetítico	38,10	61,45	38,10	4,41	39,86
Finos de Sinter Degradado	6,20	10,00	6,20	0,00	6,20
Dolomita	1,61	2,6	1,61	4,15	1,68
Calcário	4,57	7,37	4,57	4,73	4,80
Coque de Petróleo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Moinha / Carvão	11,52	18,58	11,52	10,63	12,89
Retorno	38,00	0,00	38,00	0,00	38,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	100,00	100	100	Média 3,99	103,425
					0,9601
Umidade Visada (%)	13,50	Então:	0,8650		
Umidade Real (%)	12,77	Mistura Total Úmida			115,607
Água a ser Adicionada	12,182				
	0,200	Perda na Betoneira			
	12,382				
		Água a ser Adicionada			
	15,81	==> % de água na MT			
		Retorno + FSD			
		44,200	> 5 MM = 15%	6,630	
			> 5 MM = 85%	37,570	

Fonte: THI Metalurgia 2019

Quadro 21 - Dados do processo da queima # 2 – Teste 7

DADOS DO PROCESSO		
Altura da Camada Total	mm	480
Altura da Camada de Bedding	mm	35
Altura da Camada de Bedding	Kg	9,000
Altura da Borda	mm	120
Altura da Camada de Mistura	mm	325
Volume de Água Adicionada	Kg	12,382
% Água na M. Total	%	15,81
Tempo de Misturamento	Minutos	5,00
Tempo de Micropelotização	Minutos	8,00
	Total	13,00
Moinha para Ignição	Kg	0,800
Tempo de Ignição	Segundos	1,77
Mistura Total Carregada	Kg	114,000
Produtividade	ton./m³/Dia	14,34

Fonte: THI Metalurgia 2019

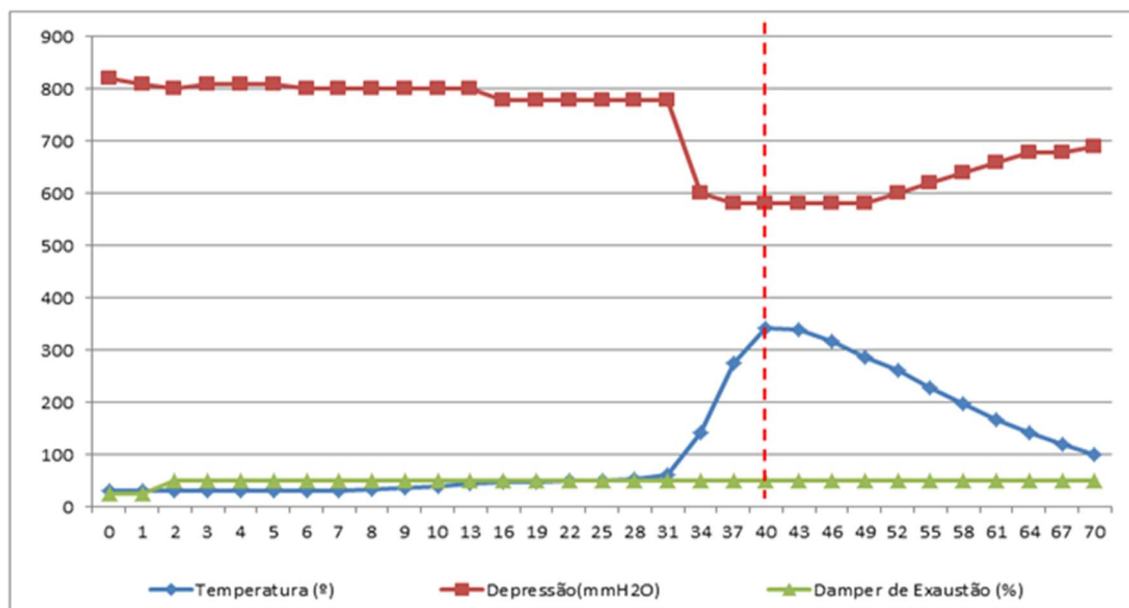
Evolução dos parâmetros no processo de queima N#2: tempo de queima foi de 43,00 min, a abertura do damper é 50 %, a temperatura foi de 316 °C e a depressão foi de 620 mm H₂O, conforme mostrado no quadro 14 e gráfico 5.

Quadro 22 - Resultados da queima # 2 – Teste 7

Evolução (Minuto)		Damper de Exaustão (%)	Temperatura (%)	Depressão (H2O)
	0	25	27	800
	1	25	27	800
	2	50	27	840
	3	50	27	840
	4	50	27	840
	5	50	27	840
	6	50	29	840
	7	50	32	840
	8	50	35	840
	9	50	38	840
	10	50	40	820
	13	50	44	820
	16	50	47	800
	19	50	49	800
	22	50	51	800
	25	50	52	800
	28	50	54	800
	31	50	76	690
	34	50	186	690
	37	50	219	660
40	50	261	670	
(PICO)	43	50	316	620
	46	50	280	610
	49	50	217	610
	52	50	196	610
	55	50	171	610
	58	50	150	610
	61	50	120	620
	64	50	110	620
	67	50	100	620

Fonte: THI Metalurgia 2019

Gráfico 5 - Resultados da Queima # 2 – Teste 7



Granulometria		
mm	Peso	%
>50	5.700	6,08
>25	9.850	10,50
>10	17.600	18,76
>5	24.100	25,69
<5	36.550	38,97
	93,800	100,00

Rendimentos:		%
SP/SP+Retorno		54,99
SP/M.total		51,87
SP/M.Parcial		83,66

Balanço	111,18
---------	--------

Sinter produto Kg	51,947
-------------------	--------

Fonte: THI Metalurgia 2019

Teste 8

Quadro 23 – Materiais de alimentação da queima # 2 – Teste 8

N # 2	QUEIMA - 8				
DATA	26/11/2019				
MATERIAL	Sinter Minério Magnetítico / Moinha de Carvão				
Alimentação Total (Kg)	100				
	Massa Total %	Massa Parcial %	Peso Seco Kg	Umidade %	Peso Úmido Kg
Matéria Prima					
Finos de Minério Magnetítico	36,88	60,46	36,88	4,41	38,58
Finos de Sinter Degradado	6,10	10,00	6,10	0,00	6,10
Dolomita	1,56	2,56	1,56	4,15	1,63
Calcário	4,50	7,37	4,50	4,73	4,72
Coque de Petróleo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Moinha / Carvão	11,96	19,61	11,96	10,63	13,88
Retorno	39,00	0,00	39,00	0,00	39,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	100,00	100	100	Média 3,99	103,415
					0,9601
Umidade Visada (%)	13,50	Então:	0,8650		
Umidade Real (%)	13,91		Mistura Total Úmida		115,607
Água a ser Adicionada	12,192				
	0,200	Perda na Betoneira			
	12,392				
		Água a ser Adicionada			
	15,81	==> % de água na MT			
		Retorno + FSD			
		45,100	> 5 MM = 15%	6,765	
			> 5 MM = 85%	38,335	

Fonte: THI Metalurgia 2019

Evolução dos parâmetros no processo de queima N#2: tempo de queima foi de 34,33 min, a abertura do damper é 50 %, a temperatura foi de 322 °C e a depressão foi de 680 mm H₂O. Conforme mostrado no quadro 14 e gráfico 5.

Quadro 24 - Dados do processo da queima # 2 – Teste 8

DADOS DO PROCESSO		
Altura da Camada Total	mm	480
Altura da Camada de Bedding	mm	40
Altura da Camada de Bedding	Kg	10,000
Altura da Borda	mm	120
Altura da Camada de Mistura	mm	320
Volume de Água Adicionada	Kg	12,392
% Água na M. Total	%	15,81
Tempo de Misturamento	Minutos	7,00
Tempo de Micropelotização	Minutos	7,00
	Total	14,00
Moinha para Ignição	Kg	0,800
Tempo de Ignição	Segundos	1,43
Mistura Total Carregada	Kg	113,150
Produtividade	ton./m ³ /Dia	10,62

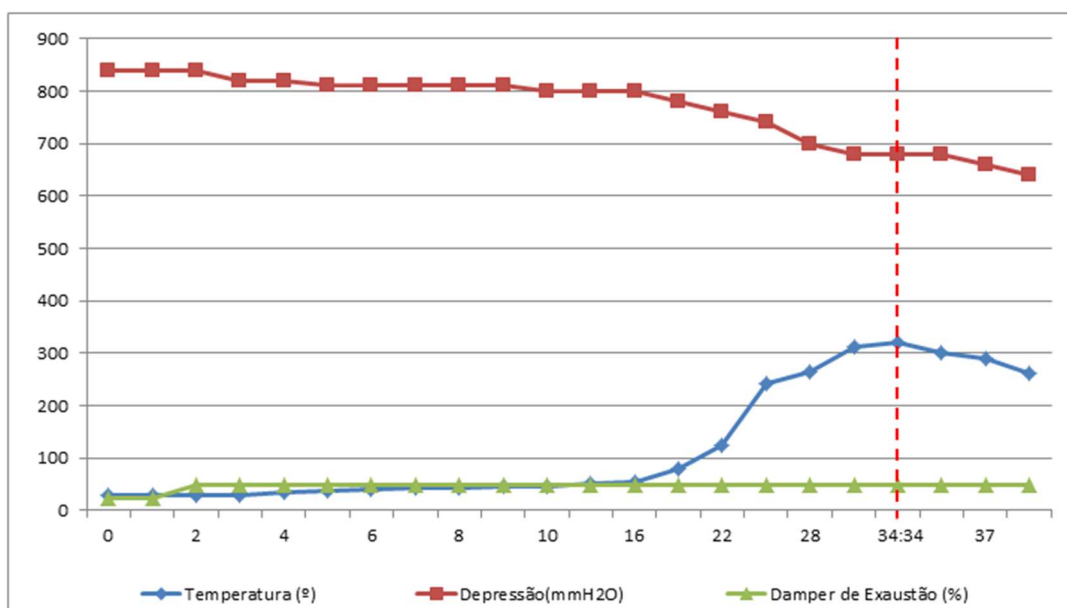
Fonte: THI Metalurgia 2019

Quadro 25 - Resultados da queima # 2 – Teste 8

Evolução (Minuto)		Damper de Exaustão (%)	Temperatura (%)	Depressão (H2O)
	0	25	29	840
	1	25	28	840
	2	50	28	840
	3	50	30	820
	4	50	34	820
	5	50	38	810
	6	50	41	810
	7	50	43	810
	8	50	44	810
	9	50	46	810
	10	50	47	800
	13	50	52	800
	16	50	54	800
	19	50	79	780
	22	50	125	760
	25	50	243	740
	28	50	264	700
	31	50	311	680
PICO	34:34	50	322	680
	34	50	302	680
	37	50	291	660
	40	50	261	640
	43	50	235	660
	46	50	215	640
	49	50	201	620
	52	50	189	620
	55	50	156	620
	58	50	138	660
	61	50	115	660
	64	50	107	700
	67	50	100	700

Fonte: THI Metalurgia 2019

Gráfico 6 - Resultados da Queima # 2 – Teste 8



Granulometria		
mm	Peso	%
>50	7,800	8,16
>25	9,800	10,26
>10	20,300	21,25
>5	24,300	25,43
<5	33,350	34,90
	95,550	100,00

Rendimentos:		%
SP/SP+Retorno		59,13
SP/M.total		58,00
SP/M.Parcial		95,09

Balanço	100,51
---------	--------

Sinter produto Kg

Fonte: THI Metalurgia 2019

Abaixo segue quadro com parâmetros das diversas queimas realizadas dentro das basicidades sugeridas, conforme mostrado nos quadros 38 e 39 para o coque de petróleo e o carvão vegetal.

Quadro 26 - Parâmetros das queimas N#1, N#2, N#3

		Coque Petroleo - IB=1,40				Carvão Vegetal - IB=1,40				Carvão Vegetal - IB=1,80			
		Queimas - N / 1				Queimas - N / 2				Queimas - N / 3			
		N-1/Q-1	N-1/Q-2	N-1/Q-3	Média	N-2/Q-6	N-2/Q-7	N-2/Q-8	Média	N-3/Q-5	N-3/Q-6	N-3/Q-7	Média
Sinter Produto	Kg	64,130	64,200	61,970	190,300	41,800	42,160	46,310	130,270	48,360	51,080	54,350	153,790
Produtividade	ton./m²/Dia	11,82	14,62	12,49	12,98	6,87	6,26	8,71	7,28	9,50	8,89	11,41	9,93
Mistura Seca Carregada	Kg	101,886	101,434	101,829	305,15	99,442	100,054	97,411	296,91	102,705	100,153	103,917	306,78
Rendimento SP/M.Total	%	62,94	63,29	60,86	62,36	42,03	42,14	47,54	43,88	47,09	51,00	52,30	50,13
Tempo de Ignição	segundos	1,50	1,73	1,52	1,58	1,77	1,80	1,43	1,67	1,83	1,83	1,83	1,83
Tempo Sinterização	Minutos	33,23	26,88	30,37	30,16	37,23	41,20	32,56	37,00	31,17	35,16	29,17	31,83
Temperatura-Pico	°C	250	251	288	263	343	316	322	327	307	310	329	315
Depressão-Pico	mmCa	548	558	547	551	580	620	680	627	600	580	560	580
Camada de Mistura	mm	215	210	220	215	325	320	320	322	340	340	340	340
Camada de Bedding	Kg	9	9	9	9	9	9	10	9	10	10	10	10
Densidade de Carga	ton/m³	1,19	1,18	1,18	1,18	1,20	1,21	1,21	1,21	1,24	1,22	1,24	1,23
Umidade	%	6,97	6,53	6,45	6,65	12,77	12,54	13,91	13,07	12,48	13,4	11,56	12,48
Misturamento	minutos	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	7,00	7,00	6,33	7,00	7,00	7,00	7,00
Micropelotização	minutos	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	7,00	7,00	7,33	7,00	7,00	7,00	7,00
Granulometria		Q-1	Q-2	Q-3	Média	Q-6	Q-7	Q-8	Média	Q-5	Q-6	Q-7	Média
>50 mm	%	20,50	4,41	12,54	12,48	6,08	7,94	8,16	7,39	9,10	13,68	13,57	12,12
>25 mm		22,88	29,43	20,77	24,36	10,51	12,02	10,26	10,93	15,22	15,13	13,88	14,74
>12 mm		23,96	29,22	30,62	27,93	18,77	20,96	21,25	20,33	25,21	22,37	25,81	24,46
>5 mm		12,01	15,07	13,58	13,55	25,71	20,12	25,43	23,75	18,31	19,69	19,71	19,24
<5 mm		20,65	21,87	22,49	21,67	38,93	38,96	34,90	37,60	32,16	29,13	27,03	29,44
Rendimentos:		Q-1	Q-2	Q-3	Média	Q-6	Q-7	Q-8	Média	Q-5	Q-6	Q-7	Média
SP/SP+Retorno	%	73,21	71,69	70,82	71,91	49,29	49,33	54,14	50,92	58,91	60,67	64,43	61,34
SP/M.total		62,94	63,29	60,86	62,36	42,03	42,13	47,55	43,90	47,08	51,00	52,30	50,13
SP/M.Parcial		82,82	83,28	80,08	82,06	67,80	67,96	77,94	71,23	73,57	79,69	81,72	78,33
Retorno Carregado	%	24,00	24,00	24,00	24,00	38,00	38,00	38,00	38,00	36,00	36,00	36,00	36,00
Retorno Gerado		20,65	21,87	22,49	21,67	38,97	38,96	34,90	37,61	31,46	29,88	27,03	29,46
Balanço Retorno	%	98,13	104,79	105,42	103	111,20	112,00	100,50	103	96,00	93,20	85,83	103
Consumo Especifico		Q-1	Q-2	Q-3	Total	Q-6	Q-7	Q-8	Total	Q-5	Q-6	Q-7	Total
S / Feed Baratinha	Kh/t/Sinter	885,72	880,83	916,08	894,21	906,40	894,22	775,75	858,79	800,87	739,38	721,01	753,76
FSD		120,74	120,08	124,88	121,90	147,50	147,14	128,31	140,98	135,92	125,49	122,37	127,92
Dolomita		33,52	33,34	34,67	33,84	38,30	37,50	32,81	36,20	34,83	32,16	31,36	32,78
Calcario		88,97	88,48	92,02	89,82	108,72	108,46	94,66	103,94	134,86	124,51	121,41	126,93
Coque de Petroleo		78,48	78,05	81,17	79,24								
Moinha/Carvão						274,06	284,07	251,57	269,90	252,73	233,32	227,53	237,86
Retorno		381,30	379,19	394,37	384,95	904,02	901,81	820,35	875,39	764,55	705,86	688,32	719,58
TOTAL		1588,74	1579,97	1643,20	1603,97	2379,00	2373,20	2103,45	2285,22	2123,76	1960,71	1912,00	1998,82
Mistura Total		Q-1	Q-2	Q-3	Média	Q-6	Q-7	Q-8	Média	Q-5	Q-6	Q-7	Média
S / Feed Baratinha	%	55,75	55,75	55,75	55,75	38,10	37,68	36,88	37,55	37,71	37,71	37,71	37,71
FSD		7,60	7,60	7,60	7,60	6,20	6,20	6,10	6,17	6,40	6,40	6,40	6,40
Dolomita		2,11	2,11	2,11	2,11	1,61	1,58	1,56	1,58	1,64	1,64	1,64	1,64
Calcario		5,60	5,60	5,60	5,60	4,57	4,57	4,50	4,55	6,35	6,35	6,35	6,35
Coque de Petroleo		4,94	4,94	4,94	4,94								
Moinha/Carvão						11,52	11,97	11,96	11,82	11,90	11,90	11,90	11,90
Retorno		24,00	24,00	24,00	24,00	38,00	38,00	39,00	38,33	36,00	36,00	36,00	36,00
TOTAL		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: THI Metalurgia, 2019

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Figura 44 - Sínter produzido após a britagem

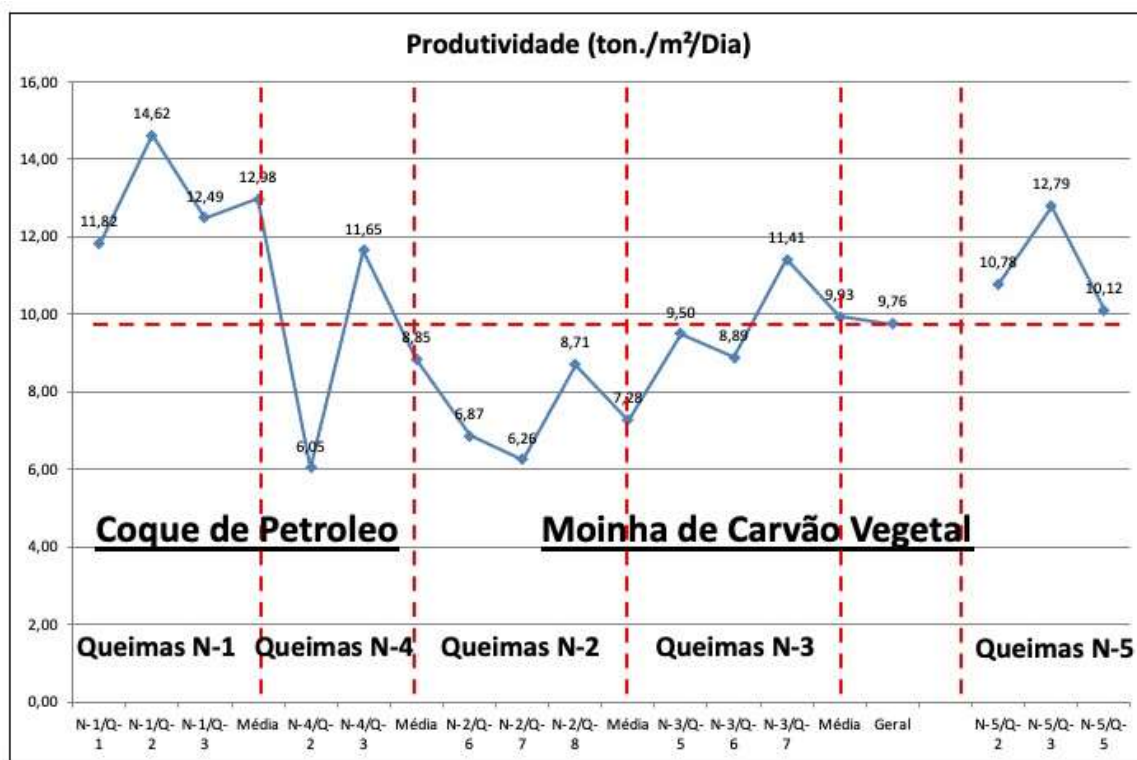


Fonte: THI Metalurgia, 2018

A Figura 44 registra as imagens colhidas do sinter produto após britagem e peneiramento, em que são segmentados os sinteres de acordo com a granulometria obtida.

Os gráficos abaixo apresentam os dados obtidos a partir das queimas e beneficiamento dos sínteres processados na planta piloto de sinterização, situada no município de Santa Luzia, MG.

Figura 45 - Gráfico Produtividade (ton./m²/Dia)

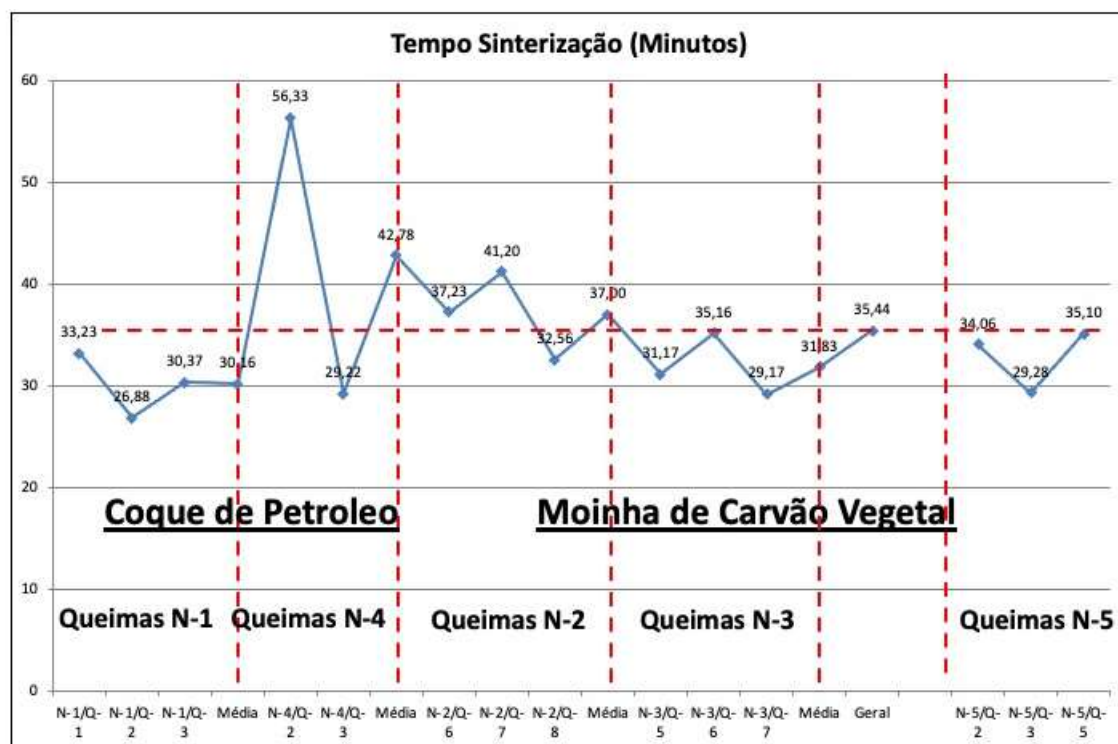


Fonte: THI Metalurgia, 2019

A partir dos resultados obtidos e registrados do gráfico conclui-se que a produtividade assinalada com coque de petróleo quando utilizado como combustível em N#1 foi maior que em N#2, que utilizou moinha de carvão vegetal. A utilização de um combustível mais rico em termos da quantidade de carbono fixo e homogeneidade de morfologia apresenta a tendência de registro na produtividade coerente com a melhor qualidade do combustível.

Cabe ressaltar também que a morfologia do coque de petróleo que, além do tamanho mais homogêneo de partícula proporciona uma combustão e distribuição de calor mais equitativa, também inibe perda de permeabilidade na caixa, pois não apresenta estrutura lamelar. A permeabilidade é fator fundamental para a passagem dos gases, bem como o tamanho e homogeneidade de micro pelotas. Neste caso, estruturas lamelares, como as que estão presentes na moinha de carvão vegetal, prejudicam a permeabilidade.

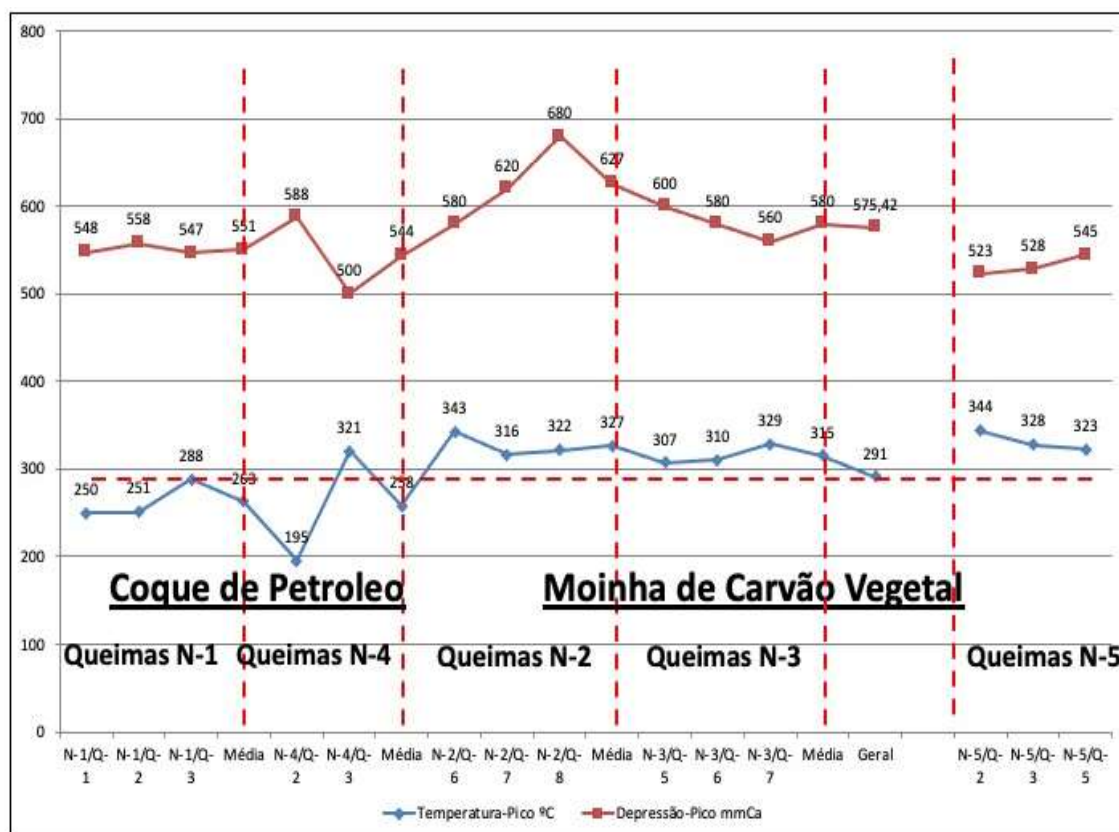
Figura 46 - Gráfico Tempo de sinterização (Minutos)



Fonte: THI Metalurgia, 2019

O tempo médio de sinterização em N#1 mostra-se inferior ao tempo de sinterização em N#2. Como uma forma de comparação, a dispersão na granulometria da moinha de carvão vegetal e sua forma lamelar impõe uma distribuição de calor na mistura irregular, na proporção que o coque de petróleo tem menor dispersão em tamanho de partículas, levando a uma melhor distribuição na mistura. A massa a ser sinterizada recebe calor de forma mais homogênea e gradual, compatibilizando o tempo de queima por camada com o tempo de sinterização. Assim sendo, os fatores como distribuições homogêneas de partículas de coque de petróleo e melhor distribuição na energia contribuem para uma queima também mais efetiva, resultando um tempo de processamento menor.

Figura 47 - Temperatura / Depressão



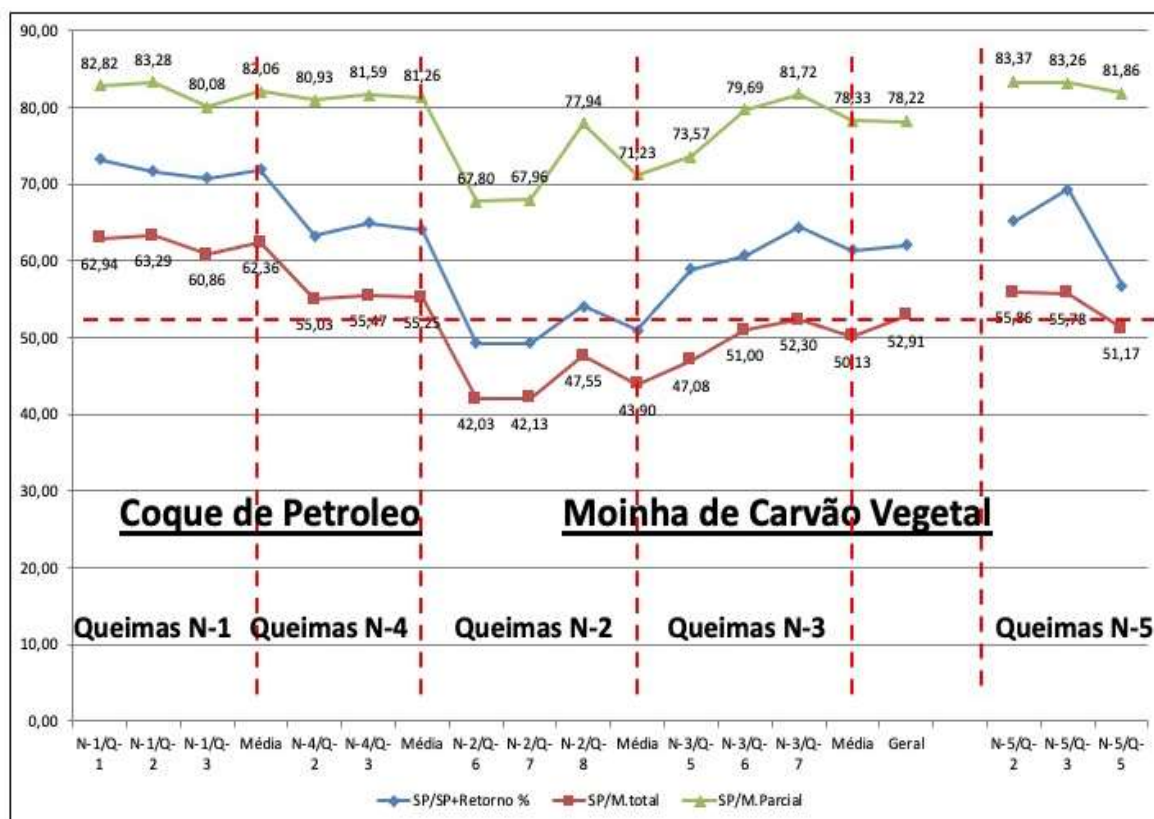
Fonte: THI Metalurgia, 2019

A faixa de depressão obtida nas várias queimas realizadas se mostra muito estável, indicando uma permeabilidade média de carga previsível e relativamente homogênea. Para todas as queimas realizadas, considerando a basicidade da mistura 1,4, obteve-se faixas de depressão com no máximo de 100mmca de diferença. Dessa forma, a depressão não se mostrou como fator impactado pela utilização de combustíveis diferentes.

Por outro lado, nota-se uma razoável diferença nas temperaturas dos gases medidos, o que aponta para um cenário em que o coque de petróleo queima mais gradualmente e a moinha de carvão vegetal é mais reativa e queima mais rápido.

A reatividade da queima do carvão vegetal, comparada à do coque de petróleo, leva a uma queima de combustível que antecede a frente de sinterização, ou seja, a velocidade de sinterização, e a compatibilização da velocidade da queima do combustível com a velocidade da frente de sinterização leva a um melhor aproveitamento da energia.

Figura 48 - Rendimento



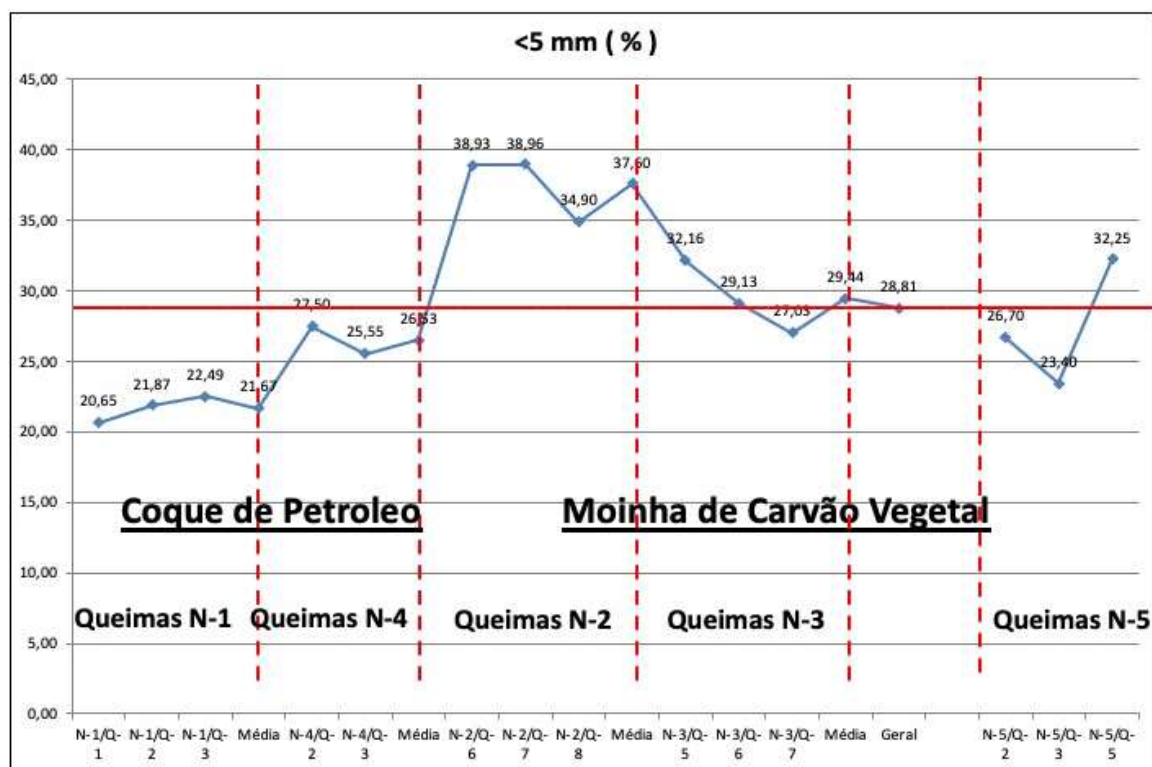
Fonte: THI Metalurgia, 2019

O rendimento utilizando-se coque de petróleo segue a tendência de garantir melhor homogeneidade de queima e melhor distribuição na carga, proporcionando um produto com melhor rendimento de massa e, portanto, uma produtividade melhor.

Assim sendo, o sínter processado com coque de petróleo se mostra mais coeso, gera menos finos e, portanto, aponta para uma melhor resistência mecânica.

O rendimento, como relação direta da não cremação de finos de retorno, é função do atendimento dos parâmetros da sinterização, tais como granulometria dos constituintes, quantidade de calor doado e homogeneidade das distribuições deste calor.

Figura 49 - Percentual de Finos



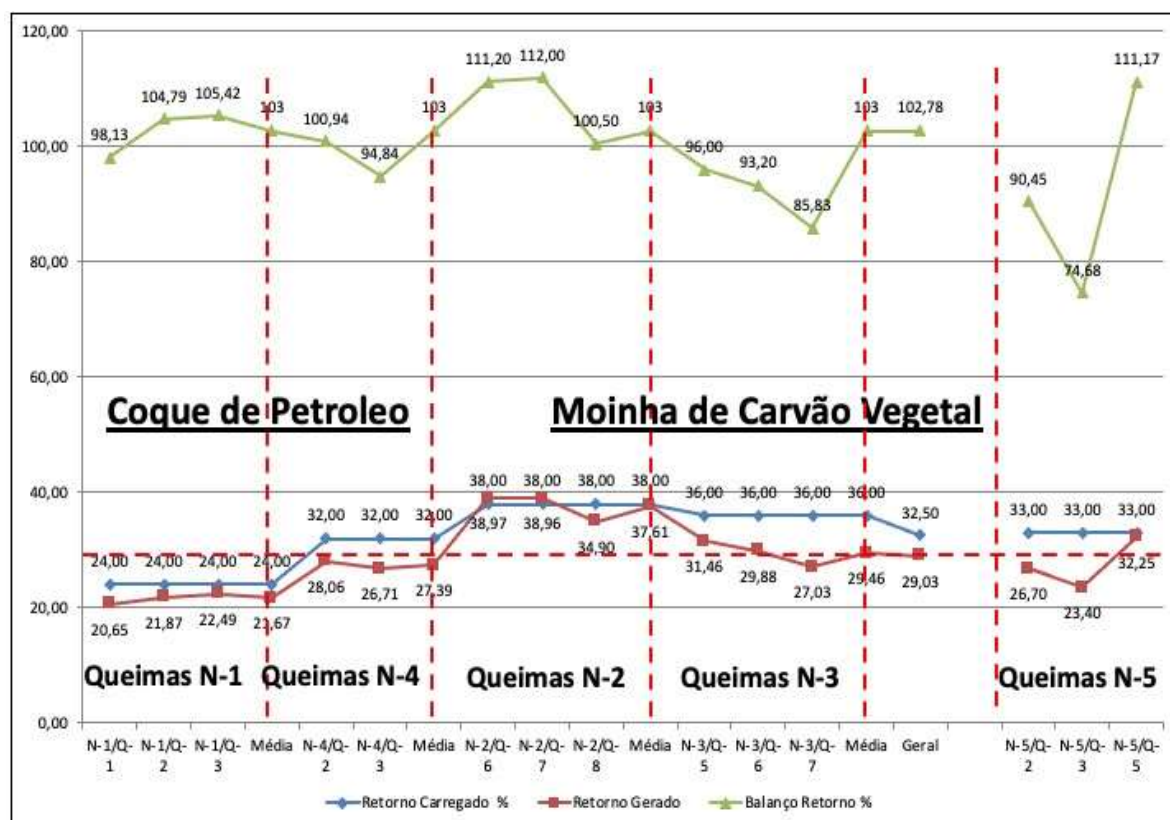
Fonte: THI Metalurgia, 2019

O percentual de finos gerados abaixo de 5mm reforça os resultados do gráfico de rendimento, demonstrando que a utilização do coque de petróleo teve melhor performance na comparação com a moinha de carvão vegetal.

Os experimentos indicam melhor sinterabilidade e coesão no sínter utilizando como combustível o coque de petróleo, com menor geração de finos.

A sinterabilidade quando potencializada leva a melhor coesão do sínter, melhor resistência mecânica, uma melhor aglomeração, maior estabilidade e melhor cremação de finos.

Figura 50 - Gráfico Retorno Carregado/Retorno Gerado/Balanco (%)



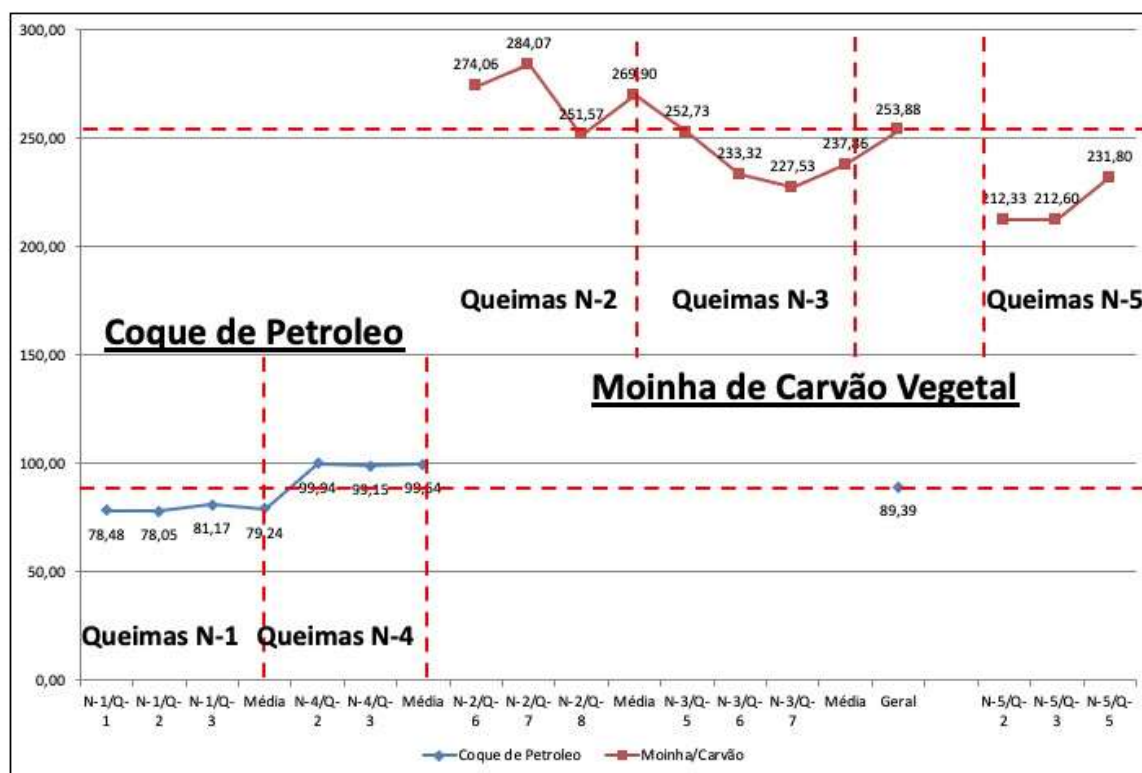
Fonte: THI Metalurgia, 2019

O balanço relativo à utilização de finos de retorno gerados no processo apresenta-se estável, ou seja, sem muita variação, mesmo considerando ajustes de parâmetros e experimentações realizadas a cada queima. Desta forma, a utilização de coque de petróleo ou moinha de carvão vegetal nas queimas não apresentou vantagens comparativas.

Nota-se que combustíveis diferentes geram patamares próprios de geração/reutilização de finos no leito de fusão. Dessa forma o sínter via rota de coque de petróleo se mostra mais produtivo.

Cabe evidenciar que a utilização de finos de retorno está diretamente ligada à geração destes. Assim sendo, a menor utilização de finos de retorno evidencia uma maior produtividade.

Figura 51 - Umidade (%)



Fonte: THI Metalurgia, 2019

Este gráfico apresenta uma tendência de menor consumo de coque de petróleo com relação à moinha de carvão vegetal. O poder calorífico do coque de petróleo é superior ao da moinha de carvão vegetal, tendo como vantagem competitiva a utilização de menor quantidade de coque na mistura.

Quadro 27 - Resultado do teste de Queda

Coque Petróleo - IB=1,40		Carvão Vegetal - IB=1,40	
Queimas - N / 1	66,33	Queimas - N / 2	54,88

Fonte: THI Metalurgia, 2019

Os testes realizados no dispositivo de shatter test para avaliação da resistência mecânica do sínter indicaram para a basicidade 1,4 uma performance superior do sínter que utilizou como combustível o coque de petróleo, conforme quadro. O sínter via rota coque de petróleo apresenta índice de shatter test 20% superior ao sínter via moinha de carvão vegetal. Este dado evidencia a tendência objetiva de garantir menor geração de finos no manuseio e transporte do sínter até sua utilização no alto forno, o que encaminha uma vantagem competitiva relevante.

5 CONCLUSÃO

A partir das queimas realizadas na planta piloto, frente aos resultados obtidos, pode-se concluir que o coque de petróleo quando utilizado como combustível apresentou uma performance melhor nos vários testes e parâmetros submetidos, devido a algumas características intrínseca deste combustível, como: sua homogeneidade granulométrica decorrente de sua morfologia; maior quantidade de carbono fixo; baixo teor de humidade, contribuindo para um melhor rendimento e menor consumo deste combustível que, aliado a uma cremação e distribuição de calor mais equitativa, inibe uma perda relevante de permeabilidade na caixa, resultando menos geração de finos menor que 5 mm, bem como tempos de sinterização, pois a massa a ser sinterizada, ao receber calor de forma mais homogênea e gradual, compatibiliza o tempo de queima por camada com o tempo de sinterização, que o torna um forte aliado dentro de uma siderurgia cada vez mais competitiva num mercado em busca de vantagens comparativas nos processos produtivos e qualitativos. Enquanto isso, os resultados entregues pela moinha de carvão quando utilizada como combustível, somente nas avaliações de retornos carregados e retornos gerados e utilização de coque de petróleo ou moinha de carvão vegetal nas queimas, não apresentou vantagens comparativas com relação às demais queimas realizadas. Sua performance apresentou-se inferior, corroborando com suas características, que são: dispersão na granulometria, sua forma lamelar, queima mais reativa que provoca uma distribuição irregular de calor na mistura. Tudo isso foi visto nos testes realizados para cada queima no dispositivo de shatter test (teste de queda) de avaliação da resistência mecânica do sinter, que indicaram para a basicidade 1,4 uma performance inferior do sinter que utilizou como combustível a moinha de carvão vegetal. Nas avaliações feitas dos resultados obtidos para as diversas queimas realizadas com os dois combustíveis, abrem-se novas perspectivas de pesquisas na busca de mistura de finos de minérios com base magnética para uma crescente demanda de minerais de boa concentração: minério bitolado de alto teor de ferro e com a sílica e fósforo dentro de limites adequados.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Identificar outras matérias primas a serem inseridas na composição das misturas, capazes de aumentar a performance dos combustíveis durante o processo de sinterização e de manter sua resistência mecânica.

Identificar novas formas de combustíveis com parâmetros econômicos e de produtividades superiores aos atuais.

REFERÊNCIAS

ASHBY, M. F. (1974). **Acta Metalúrgica**, 22, 275 - 89.

CHIAVERINI, V. (1986). **Tecnologia Mecânica. Estruturas e Propriedades dos Metais e Ligas - Processos de Fabricação**. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 2ª edição, v.1, 477p.

BROPHY, J.H.; ROSE, R.M.; WULF, J. (1972). **Ciência dos Materiais: Propriedades Termodinâmicas**. Tradução: Juarez Távora Veado. Livros Técnicos e Científicos. Editora Ltda. Rio de Janeiro, v. 2, 186p.

CARAM Jr., R. (2003). **Estrutura e Propriedades dos Materiais**. Departamento de Engenharia de Materiais. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo, Apostila, 153p.

CARDOSO, CLAUDINE GUIMARÃES LEITE. **Desenvolvimento e caracterização de sinter a partir de resíduos sólidos siderúrgicos para aplicação em aciaria**. Claudine Guimarães Leite Cardoso – Volta Redonda: Unifoa; 2016.

CARVALHO, E. A. et al. **Aglomeração. Parte I: Briquetagem**. In: **Tratamento de minérios**, 5ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.16. p.683-748.

DANA, J. D. & HURLBUT JR., C. S. **Manual de Mineralogia**. Ed. Livros Técnicos e Científicos Ed. S.A. Rio de Janeiro, 9ª Ed. 642 p., 1984.

DAWSAN, P.R. **Recent Developments in Iron Ore Sintering** - Part 1 Introduction. Ironmaking and Steelmaking, v. 20, n.2, p. 135-136, 1993.

DEHOFF, R.T.; RHINES, F.N. (1968). **Materials Science and Engineering Series. Quantitative Microscopy**. McGraw-Hill Series in Materials and Engineering, 422p.

CARVALHO, EA Carvalho 2010 . **Aglomeração – Parte I: Briquetagem. CETEM. Pelotização Parte II**. CETEM.

DNPM Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral** / Coordenadores Thiers Muniz Lima, Carlos Augusto Ramos Neves Brasília: DNPM, 2013.

FEDORENKO, S.B.; SOKOLEVSKIRKH, G.F.; RUSYAKOVA, M.G. et al. **Properties of Sinter of Basicity 0.6-3.4**. Metallurgist, v.14, n.9, pp. 552-554, 1970.

Fonte: Internet ISO 9000:2005 – **Definição de processo** 2019.

GOMES, O.D.F.M., IGLESIAS, J.C.A., PACIORNIK, S., VIEIRA, M.B.. **Classification of hematite types in iron ores through circularly polarized light microscopy and image analysis**. *Mineral Engineering* 52, 2013, pp.191-197.

GONZAGA, Ligia Mara. **Separação Magnética a úmido de Minérios de Ferro Itabiríticos**. Ligia Mara Gonzaga. – Rio: UFRJ/ COPPE, 2014.

HONORATO, E.P. **Adequação granulométrica das matérias-primas e do sistema de segregação contínua (I.F.S.) para melhorias na produtividade e qualidade do sinter para os altos-fornos**. Belo Horizonte, 2005.

IBRAM. **Informações e Análise da Economia Mineral de Janeiro Brasileira**. 7ª Edição. Instituto Brasileiro de Mineração. Dezembro/2012. Acesso em: Junho de 2014.

KINGERY, W.D.; BOWEN, H.K.; UHLMANN, D.R. (1976). **Introduction to Ceramics**. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York. London. Sydney. 1032p.

LUZ, A. B; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 960p.

LUZ, Adão B. (Ed.). III. SAMPAIO, J.A. (Ed.) IV. FRANÇA, S.C.A. (T.d.). **Tratamento de Minérios 2**. Cominuição 3. Flotação 4. Barragem de Rejeito. I. Centro de Tecnologia Mineral. II.

LUZ, Adão Benvindo (Ed.); SAMPAIO, João Alves (Ed.); ALMEIDA, Salvador Luiz Matos (Ed.). **Tratamento de Minérios 2010**. 5ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 932p.

MALAN, J.; BARTHEL, W.; DIPPENAAR, B.A. (2004). **Optimizing manganese ore sinter plants**: Process, parameters and design implications. In: Tenth International Ferroalloys Congress. Cape Town, South Africa, 1 - 4 February, p. 281 - 290.

MALYSHEVA, T. Ya.; YUSFIN, Yu. S.; MANSUROVA, N.R.; GIBADULIN, M.F.; LEKIN, V.P. **Mechanism of Mineral Formation and Metallurgical Properties of Sinter of Basicity** 1.1-3.1 at OAO MMK. *Steel in Translation*, v. 7, n. 2, p 126-130, 2007.

MOURÃO, M.B.; YOKOJI, A.; MALYNOWSKYL, A.; LEANDRO, C.A.; SILVA.; TAKANO, C.; QUITES, E.E. C.; GENTILE, E.F.; LENZ E SILVA, G.F.B.; BOLOTA, J.R.; GONÇALVES, M.; FACO, R.J. (2007). **Introdução à Siderurgia**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. São Paulo, 428 p.

NEUMANN, R., 2014. **Comunicação Pessoal**.

NEUMANN, R., SCHENEIDER, C.L., NETO, A.A. **Caracterização Mineralógica de Minérios Parte II**. p.92-93. *Tratamento de Minérios*, 5ª ed. Rio de Janeiro, 2010.

NEUMANN, R.; SCHNEIDER, C.L.: ALCOVER NETO, A. In: **Tratamento de minérios, 5ª ed.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.3. p.85-137.

OLIVEIRA, Ricardo Santos, dissertação de mestrado - **Produção de coque metalúrgico através da utilização parcial de briquetes de carvão mineral** [manuscrito] / Ricardo dos Santos Oliveira – 2017 – REDEMAT UFPO – UEMG.

PINHEIRO, P. (1995). **Solidificação e Sinterização. Teoria da capilaridade, sinterização e metalurgia do pó.** Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia Metalúrgica. Apostila. v. 1, p. 101.

REED, J. S. (1986). **Introduction to the Principles of Ceramic Processing.** John Wiley & Sons. New York, 486 p.

ROSIÈRE, C. A. & CHEMALE Jr., F. Textural and structural aspects of iron ores from Iron Quadrangle, Brazil. Source, Transport and Deposition of Metals. Pagel & Leroy (Eds), Balkema, Rotterdam, p. 485 – 488, 1991.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR., F. & GUIMARÃES, M. L. V. **Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero.** Parte I: Estruturas e Recristalização. Geonomos, v.1, n. 1, p. 65 –84, 1993a.

SRB, J; RUZICKOVÁ, Z. **Pelletization of fines.** 1. Ed. Praga, Elsevier, 1988.

TING, J.M.; LIN, R.Y. (1994). **Effect of Particle - Size Distribution on Sintering.** Part I Modelling. Journal of Materials Science, v.29, p. 1867 - 1872.