



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

BRENDA THAYSSA FIGUEIRA DANIEL

**AVALIAÇÃO DA ALTURA DO LEITO DE SINTERIZAÇÃO DE FINOS DE
MINÉRIO DE FERRO EM UM REATOR VERTICAL DE LEITO
FIXO PARA A PRODUÇÃO DE SÍNER**

ANANINDEUA
2018

BRENDA THAYSSA FIGUEIRA DANIEL

**AVALIAÇÃO DA ALTURA DO LEITO DE SINTERIZAÇÃO DE FINOS DE
MINÉRIO DE FERRO EM UM REATOR VERTICAL DE LEITO
FIXO PARA A PRODUÇÃO DE SÍNTER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Pará, em cumprimento as exigências para a obtenção do Grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia – Ênfase em Tecnologia Mineral.

Orientador: Prof. Msc. Alacid do S. Siqueira Neves.

Coorientador: Prof. Dr. Daniel José Lima de Sousa.

ANANINDEUA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo (a) autor (a)

D184a Daniel, Brenda Thayssa Figueira
AVALIAÇÃO DA ALTURA DO LEITO DE SINTERIZAÇÃO DE FINOS DE MINÉRIO DE FERRO EM UM REATOR VERTICAL DE LEITO FIXO PARA A PRODUÇÃO DE SÍNTER / Brenda Thayssa Figueira Daniel. — 2018
79 f.: il. color

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2018.

Orientação: Prof. Me. Alacid do Socorro Siqueira Neves

Coorientação: Prof. Dr. Daniel José Lima de Sousa.

1. Metalurgia Extrativa. 2. Sinterização de Finos de Minério de Ferro. 3. Caracterização físico-química. 4. Sínter. 5. Reator Vertical de Leito Fixo. I. Neves, Alacid do Socorro Siqueira, *orient.* II. Título

BRENDA THAYSSA FIGUEIRA DANIEL

**AVALIAÇÃO DA ALTURA DO LEITO DE SINTERIZAÇÃO DE FINOS DE
MINÉRIO DE FERRO EM UM REATOR VERTICAL DE LEITO
FIXO PARA A PRODUÇÃO DE SÍNER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Ciência e Tecnologia da
Universidade Federal do Pará, em cumprimento
as exigências para a obtenção do Grau de
Bacharel em Ciência e Tecnologia – Ênfase em
Tecnologia Mineral.

Data da Avaliação: ____ / ____ / ____

Conceito: _____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Msc. Alacid do Socorro Siqueira Neves
(FEMAT - UFPA - Campus Ananindeua - Orientador)

Prof. Dr. Daniel José Lima de Sousa
(FCET - UFPA - Campus Ananindeua - Coorientador)

Prof. Dra. Danielly da Silva Quaresma
(UEPA – Membro Externo)

Eng. Msc. Dilson Nazareno Pereira Cardoso
(PRODERNA - ITEC - UFPA – Membro Externo)

Dedico este trabalho a Deus e Nossa Senhora de Lourdes, a minha família, amigos e a todos que contribuíram direta ou indiretamente em minha formação pessoal e acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e Nossa Senhora de Lourdes que deram-me saúde e força para superar as dificuldades existentes na graduação todos os dias, não deixando faltar motivação e coragem ao longo da minha vida.

A toda a minha família em geral pelo apoio incondicional e dedicação, em especial a minha amada mãe Márcia Figueira que mesmo pelas dificuldades da vida, sempre priorizou e incentivou a minha educação para que eu pudesse conquistar tudo que tenho hoje, a meu padrasto, Fábio Ferreira, por todo auxílio e ensinamentos que me concedeu nas dificuldades que obtive com os cálculos e por ter assumido esse papel de pai, e meus irmãos, Thalyta Daniel e Lucas Sampaio, que foram parceiros e amigos fundamentais nesta caminhada.

Ao meu pai, Jorge Daniel, pelo incentivo e apoio na minha carreira acadêmica e vida pessoal.

Aos meus queridos avós Maria e José Figueira, que depositaram toda a fé em mim, visto que fui a primeira neta a ingressar e formar em uma universidade federal, dando todo o orgulho a minha família.

Aos amigos de coração que conquistei neste curso, apesar de cada um ter seguido seu próprio caminho, o amor e a amizade prevaleceu, obrigada pelos momentos memoráveis.

Às amigas que ganhei no LEQ (Laboratório de Engenharia Química), local onde estagiei e obtive grandes aprendizados, em especial o Sr. Augusto Freitas meu supervisor, Dilson Cardoso, Jefferson William e Professor Clesianu Rodrigues.

Ao meu amigo Henrique Okada e sua maravilhosa família, que me acolheu amorosamente, agradeço pela amizade, carinho e incentivos para concluir esta jornada principalmente nas horas difíceis.

Ao meu amigo Lourival Miquéias, que participou ativamente no desenvolvimento deste trabalho sem medir esforços, muito obrigada pela sua amizade durante esses anos, sua ajuda e apoio.

Ao Professor Dr. Reginaldo Sabóia, que me concedeu a oportunidade de participar de uma pesquisa de iniciação científica, onde despertou em mim a vocação em ser futuramente uma pesquisadora.

Ao meu Orientador Professor Msc. Alacid Neves e Coorientador Professor Dr. Daniel Sousa, pela confiança, amizade, ensinamentos e dedicação concedida no desenvolvimento deste trabalho e na construção da minha vida acadêmica e profissional, pois sem o apoio e incentivo dos Srs., eu não estaria concluindo esta etapa acadêmica e nem evoluindo para as futuras.

Ao corpo docente e técnico da Faculdade de Ciência e Tecnologia.

Ao Secretário Josivan Franca, pela amizade e empenho de sempre ajudar no que fosse possível nas resoluções de problemas envolvendo a faculdade.

Ao CTIC, em especial ao meu chefe Paulo Marron e meus amigos, Raquel de Sá, Luciano Lobo, Murilo Salles, Polyana Madureira, Francisco Claisson, Maria Clara, pela amizade, paciência e toda a flexibilidade concedida para que eu pudesse conciliar as atividades do trabalho com esta pesquisa.

A Empresa SINOBRAS pelo fornecimento das amostras para os experimentos.

Aos laboratórios de análises da UFPA e IFPA, que ajudaram a caracterizar os materiais para esta pesquisa.

Enfim, a todas as pessoas que contribuíram de forma direta ou indiretamente para o desenvolvimento da concretização deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho possui como objetivo a realização do processo de sinterização de finos de minério de ferro, moinha de carvão vegetal e adições, em três alturas, de um Reator de Leito Fixo e analisar os parâmetros do processo, bem como o desempenho do equipamento e a qualidade do sínter produzido. O referido processo tem como finalidade, a produção de um sínter para o processo de redução em altos-fornos. A resistência mecânica do sínter dependerá da quantidade e da composição da mistura de sinterização. Deste modo, os produtos obtidos foram caracterizados através de análises em DRX, MEV, EDS e FRX, submetido a testes de tamboreamento. Ao final pode-se afirmar que a melhor altura alcançada no leito de sinterização, dentre os três estudos aqui realizados, o Sínter 2, com a altura de 45 cm, obteve-se resultados satisfatórios, em temperaturas reais de sinterização e conseqüentemente gerando sínteres com boa qualidade para uma produção em planta piloto.

Palavras-chave: Sínter. Sinterização. Reator de Leito Fixo. Fino de Minério de Ferro. Moinha de Carvão Vegetal.

ABSTRACT

The objective of the present work is to perform the sintering process of iron ore fines, charcoal mill and additions, in three heights, of a Fixed Bed Reactor and to analyze the process parameters as well as the performance of the equipment and the quality of the sinter produced. Said process has the purpose, the production of a sinter for the reduction process in blast furnaces. The mechanical strength of the sinter will depend on the amount and composition of the sintering mixture. In this way, the products obtained were characterized by analyzes in DRX, MEV, EDS and FRX, submitted to tumbling tests. At the end, it can be stated that the best sinter bed height achieved, among the three studies carried out here, Sínter 2, with a height of 45 cm, obtained satisfactory results in real sintering temperatures and consequently generating sinters with good quality for pilot plant production.

Keywords: Sínter. Sintering. Fixed bed reactor. Fine of Iron Ore. Charcoal Coal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Faixa granulométrica ideal do sinter feed.....	19
Figura 2 - Especificação das partículas de minério de ferro em relação à eficácia de micropelotização.....	20
Figura 3 - Temperatura do leito de sinterização em função do tempo de misturas com adições	23
Figura 4 - Demonstração da modificação de dosagem do calcário e combustível.....	24
Figura 5 - Estrutura da quase partícula e do sinter com a nova forma de granulação apresentada.	25
Figura 6 – Briquetagem por compressão em rolos.....	27
Figura 7 - Disco de Pelotamento.	28
Figura 8 – Desenho esquemático da sinterização proposta por Thomas Huntington e Fherberlein.....	29
Figura 9 - Fluxo esquemático do processo de sinterização.	30
Figura 10 - Esquema simplificado do processo de sinterização para a obtenção do sinter.	31
Figura 11- Desenho esquemático da sinterização proposta Greenawalt.	32
Figura 12 - Desenho esquemático da sinterização feito por Dwight-Lloyd.....	33
Figura 13 - Desenho esquemático e de funcionamento do reator de leito fixo.	34
Figura 14 - Fluxograma das etapas do experimento.....	37
Figura 15 - Reator vertical de leito fixo, a) 7 termopares verticais, b) 1 termopar externo ao redor do reator e.....	38
Figura 16 - Vedação dos termopares com argila umedecida e adesivo de silicone, respectivamente.	39
Figura 17 - Câmara de isolamento do reator.	39
Figura 18 – Grelha de aço carbono.....	40
Figura 19 - Exaustor.	40
Figura 20 - Anemômetro.	41
Figura 21 - Fluxograma para o processo de sinterização do sinter.	41
Figura 22 - Sistema de ignição com o maçarico na região superior do reator de leito fixo.	42
Figura 23 - Aparelho de aquisição de dados <i>Paperless Recorder do tipo PHL</i>	42
Figura 24 - Fino de minério de ferro.	43
Figura 25 - Moinha de carvão vegetal.....	44
Figura 26 - Fino de calcário calcítico.	44

Figura 27 - Peneiras de análise granulométrica.....	45
Figura 28 - Processo de micropelotização para determinar o teor de umidade ótima.....	46
Figura 29 - Alturas do leito de sinterização.....	47
Figura 30 - Micropelotização das matérias-primas.	51
Figura 31 - Betoneira usada na micropelotização.	52
Figura 32- Bedding (falsa grelha).....	53
Figura 33 - Abastecimento do leito com o material pelotizado.....	53
Figura 34 - Esquema de movimento da frente de combustão.....	54
Figura 35 - Distribuição granulométrica do FMF.	57
Figura 36 - Distribuição granulométrica do MCV.	58
Figura 37 - Distribuição granulométrica do FCC.....	58
Figura 38 - Gráfico da determinação do teor de umidade ótima.	60
Figura 39 - Evolução da temperatura do 1º Experimento – Sínter 1 com a altura de 35 cm....	61
Figura 40 - Evolução da temperatura do 2º Experimento – Sínter 2 com a altura de 45 cm....	61
Figura 41 - Evolução da temperatura do 3º Experimento – Sínter 3 com a altura de 55 cm....	62
Figura 42 - Gráfico de rendimento do sínter.	63
Figura 43 - Análise MEV do Sínter 2.....	64
Figura 44 - Análise MEV do Sínter 1.....	64
Figura 45 - Análise MEV do Sínter 3.....	65
Figura 46 - Análise EDS do Sínter 1 (35 cm de altura).....	65
Figura 47 - Análise EDS do Sínter 2 (45 cm de altura).....	66
Figura 48 - Análise EDS do Sínter 3 (55 cm de altura).....	66
Figura 49 - Análise DRX do FMF.....	68
Figura 50 - Análise DRX do MCV.....	69
Figura 51 - Análise DRX do FCC.	69
Figura 52 - Análise DRX do Sínter 1.	70
Figura 53 - Análise DRX do Sínter 2.	70
Figura 54 - Análise DRX do Sínter 3.	71
Figura 55 - Gráfico de tamboreamento do sínter 1, 2 e 3.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados para a micropelotização da mistura.....	45
Tabela 2 - Valor mássico dos materiais para compor a mistura para produzir o primeiro sínter.	48
Tabela 3 - Valor mássico dos materiais para compor a mistura para produzir o segundo sínter.	49
Tabela 4 - Valor mássico dos materiais para compor a mistura para produzir o terceiro sínter.	50
Tabela 5 - Demonstração de dados gerados para o teor de umidade ótima.....	59
Tabela 6 - FRX e perda ao fogo do FCC, FMC e MCV.	67
Tabela 7 - FRX e perda ao fogo do Sínter 1, Sínter 2 e Sínter 3.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al₂O₃ – Óxido de Alumínio

CaO – Óxido de Cálcio

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

DRX – Difração de Raios X

EDS – Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X

FCC – Fino de Calcário Calcítico

FMF – Fino de Minério de Ferro

FRX – Espectrometria de fluorescência de raios X

MCV – Moinha de Carvão Vegetal

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

Mg₆Si₄O₁₀(OH)₈ – Crisotila

MgO – Óxido de Magnésio

NO_x – Óxido de Nitrogênio

RDI – Reduction Degradation Index – Índice de degradação sob redução

RI – Índice de redutibilidade

SiO – Óxido de Silício

SiO₂ – Dióxido de Silício

SO_x – Óxido de enxofre

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Materiais para a produção do sinter	18
2.1.1 Fino de Minério de Ferro (Minério)	18
2.1.2 Moinha de Carvão Vegetal (Combustível).....	21
2.1.3 Fino de Calcário Calcítico (Fundente).....	23
2.2 Processos de Aglomeração	25
2.2.1 Briquetagem	26
2.2.2 Pelotização.....	27
2.2.3 Sinterização	29
2.3 Equipamentos de Sinterização	31
2.3.1 Greenawalt – batelada	32
2.3.2 Dwight Lloyd – contínuo.....	33
2.3.3 Reator Vertical de Leito Fixo	33
2.4 Reações na Sinterização	35
2.5 Caracterização Físico-Química do Sinter.....	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 Condições para o Processo de Sinterização.....	37
3.1.1 Montagem do equipamento	37
3.1.2 Simulação física do processo de sinterização.....	41
3.2.2.1 Sistema de Ignição.....	41
3.2.2.2 Aparelho de Aquisição de Dados de Temperatura	42
3.2 Pré-Tratamento das Matérias-Primas.....	43
3.2.1 Análise granulométrica.....	44
3.2.2 Determinação do teor de umidade ótima.....	45
3.2.3 Pesagem dos Materiais a Sinterizar e do Sinter Produzido	47
3.2.4 Micropelotização	50
3.2.5 Sinterização	52
3.2.6 Rendimento.....	54

3.2.7 Caracterização do síter.....	54
3.2.7.1 Teste de tamboreamento (tumbler test)	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1 Simulação física do Reator Vertical de Leito Fixo	56
4.2 Análise granulométrica das matérias-primas	56
4.3 Teor de Umidade ótima.....	58
4.4 Temperatura	60
4.5 Rendimento da sinterização.....	62
4.6 Caracterização do síter	63
4.6.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	63
4.6.2 Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)	65
4.6.3 Fluorescência de Raios-X (FRX)	67
4.6.4 Difração de Raios-X (DRX)	68
4.6.5 Tamboreamento do síter (tumbler test).....	71
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	74
REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

A sinterização do minério de ferro é um processo de agrupamento de partículas minerais que possui como produto resultante uma massa porosa chamada sinter. Embora o sinter apresente granulometria mais grossa e homogênea do que as partículas de sinter feed, sua redutibilidade e resistência mecânica reforçam os benefícios de utilização deste produto como carga metálica do alto-forno para a produção de ferro gusa.

As matérias primas utilizadas na composição da mistura de sinterização são: finos de minério de ferro (sinter feed), combustíveis sólidos, fundentes e resíduos siderúrgicos (STARLING, 2012). Em seguida, as partículas vão sendo aglomeradas a frio mediante o acréscimo de água à mistura composta. Os agregados formados ficam sujeitos a um processo de queima em que o ponto de fusão é parcialmente atingido.

A temperatura da superfície da mistura de sinterização é elevada pela queima de gás ou óleo em queimadores localizados acima da mistura na grelha. O processo de sinterização inicia com a combustão da camada superior da mistura colocada sobre a grelha alcançando uma temperatura entre 1200°C a 1400°C. O ar quente é então succionado para baixo em direção à grelha (BALL, D.F et al., 1973).

A aglomeração dessas matérias primas representa a melhora da permeabilidade da carga e a relação entre os sólidos e o gás redutor, sendo assim, baixa a taxa de utilização de combustível e aumenta a velocidade da redução, além do que permite a queda da quantidade de poeiras arrastadas para o sistema de gás do alto-forno.

O Alto forno exige uniformidade da carga, isenção de finos, faixa granulométrica estreita e suficiente resistência mecânica para assegurar boa permeabilidade. A carga do alto-forno deve apresentar boa redutibilidade e elevado teor de ferro para que a desempenho do reator seja estável e o consumo de combustível seja minimizado. Um bom aglomerado deve resistir a elevadas temperaturas, forças e pressões internas do alto-forno sem amolecer ou decrepitar. (BALL, D.F et al., 1973).

O processo de sinterização e a qualidade do sinter obtido são diretamente influenciados pela composição da mistura de sinterização. Para Geerdes et al., (2007), as vantagens da aplicação do processo de sinterização levam a maioria das usinas mundiais a operarem com carga de sinter em seus altos-fornos superior a 60%.

Neste contexto a larga utilização do sinter nos processos de fabricação de aço justifica o foco que será dado neste trabalho ao processo de aglomeração por sinterização de finos de minério de ferro, moinha de carvão vegetal (resíduos gerados durante a produção de

ferro gusa), e adições, visto que a etapa de sinterização exerce importância no controle ambiental por ser a maior consumidora de rejeitos gerados nos processos de produção de usinas siderúrgicas, em que os rejeitos retornam como matéria-prima no processo de sinterização.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho possui como objetivo geral realizar o processo de sinterização, em três alturas, de um reator de leito fixo, com a finalidade de produzir um sinter a partir de finos de minério de ferro, moinha de carvão vegetal e fino de calcário calcítico.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Montagem do equipamento;
- Identificações das necessidades e funções do equipamento;
- Simulação física do processo;
- Verificação da melhor altura para a produção do sinter;
- Caracterização do sinter produzido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais para a produção do sinter

Basicamente, são utilizados como matérias-primas para sinterização, a carga metálica (finos de minério de ferro – sinter feed), combustível sólido (finos de coque ou finos de carvão vegetal) e fundentes (óxidos básicos como CaO e MgO).

Assim como vários outros processos, a sinterização pertence a um sistema integrado onde qual a qualidade produzida por ele afetará o desenvolvimento da etapa subsequente de forma qualitativa e também econômico. Portanto, a composição química, mineralógica, física e granulométrica da mistura de finos de minério é estabelecida de acordo com a qualidade exigida pelo processo subsequente. A produção de um sinter de baixa qualidade química e/ou física ou com um alto custo produtivo afetará diretamente os resultados técnico-econômicos do Alto-Forno.

No decorrer do processo de sinterização, controles específicos são estabelecidos para que o produto final, o sinter, obtenha a qualidade mínima pretendida pelo processo seguinte, o Alto-Forno. As principais características observadas e que define a qualidade do sinter são:

- Composição química constante e controlada;
- Elevada resistência mecânica a abrasão e a queda;
- Porosidade;
- Redutibilidade e granulometria estável;
- Alto teor de ferro;
- Baixo volume de escória;
- Redução de custo de produção.

2.1.1 Fino de Minério de Ferro (Minério)

De acordo com Honorato (2005), a característica primordial a ser analisada no minério de ferro para o processo de sinterização (*sinter feed*) é a distribuição granulométrica que possui como referência ideal de um *sinter feed* a curva de Astier, que definia a dimensão máxima do minério a 6,35mm e a mínima em 0,106mm (150mesh). Com a chegada de novas tecnologias na elaboração de misturas e a necessidade de se operar com uma mistura de minério ao invés de somente um tipo, viabilizaram uma faixa granulométrica maior e flexível.

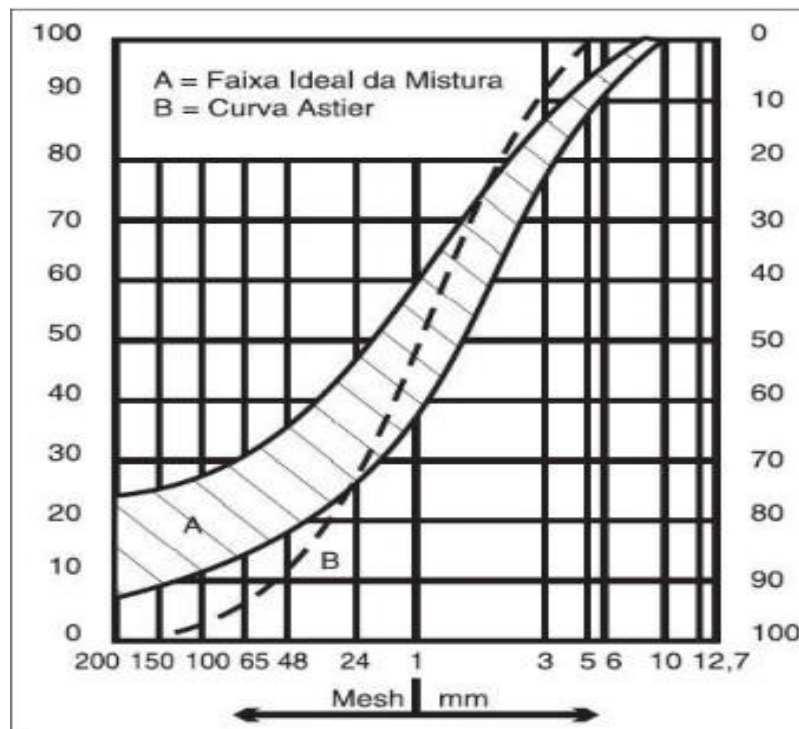
Segundo a curva de Astier, a Figura 1 indica a classificação granulométrica e a faixa

aceitável nas sinterizações atuais.

A distribuição granulométrica do *sinter feed* deve conter:

- 0% de partículas maiores que 9,5mm;
- 5 a 7% no máximo de partículas maiores que 6,35mm;
- 45 a 60% de partículas entre 1,0 e 6,35mm;
- 10 a 25% no máximo de partículas abaixo de 0,106mm (150mesh).

Figura 1 - Faixa granulométrica ideal do *sinter feed*.



Fonte: Honorato (2005).

As porções de minérios de ferro podem ser identificadas quanto à eficiência de micropelotização. Portanto, as partículas situadas no intervalo entre 0,7 e 6,3mm são apontadas como nucleantes, as que se encontram entre 0,2 e 0,7mm são consideradas intermediárias e as acima de 0,106mm (150mesh) até 0,2mm são julgadas como aderentes.

A Figura 2 mostra a classificação adotada pela Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation (ISHIKAWA, 1982; VIEIRA et al., 2003).

Figura 2 - Especificação das partículas de minério de ferro em relação à eficácia de micropelotização.

Partículas do <i>sinter feed</i>		Estrutura ideal do microaglomerado (a frio)
6,3 mm	<p>Supergrossas</p> <p>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.</p>	 <p>Partículas Aderente</p>
	<p>Nucleantes 2</p> <p>Nucleantes</p> <p>Apresentam a capacidade de aderir as partículas mais finas ao seu redor e constituem-se nos núcleos dos aglomerados.</p> <p>São partículas policristalinas anidras ou hidratadas e não devem participar efetivamente no fenômeno de formação de líquido durante a queima.</p> <p>Deve-se controlar a quantidade de partículas nucleantes goethíticas (altos valores de PPC e de P) de modo a evitar a alta contração e formação de grandes trincas no bolo de sinterização e aumento do teor de fósforo no <i>sinter</i> e no gusa.</p>	
3,0 mm	<p>Nucleantes 1</p> <p>São os nucleantes ideais, pois são mais efetivos com relação a capacidade de formar a camada aderente.</p> <p>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 <i>sinter</i>.</p> <p>Não devem conter sílica oclusa na sua estrutura ou mesmo na forma liberada.</p>	<p>Tramas das Partículas Nucleantes</p> <p>Granoblástica: Cristais xenomorfos de hematita complexamente interescudidos (Ex. Minas de Mutuca, C. Feijão, Carajás, etc.)</p> <p>Lepidoblástica: Cristais orientados de hematita ao longo do plano basal (Ex. Minas de Andrade, Cauê, Morro Agudo, etc.)</p> <p>Mosaico: Cristais de bordas retas sem orientação preferencial. (Ex. Minas de Casa de Pedra, Cauê, Andrade, etc.)</p> <p>Microgranular: Hematita microcristalina disposta em uma trama granoblástica (Ex. Minas de Carajás e Corumbá).</p> <p>Treliça: Cristais alongados sem orientação preferencial (Ex. Minas de Carajás).</p>
1,0 mm ou 0,7 mm	<p>Intermediárias</p> <p>Essas partículas não se comportam nem como nucleantes e nem como aderentes. Devem ser minimizadas na composição da mistura a sinterizar.</p>	<p>Tipologia das Partículas Aderentes e Nucleantes:</p> <p>Especularísticas (Ex. Minas de Cauê, Andrade, etc.).</p> <p>Martíticas (Ex. Minas da Mutuca, C. Feijão, etc.).</p> <p>Granulares (Ex. Mina do Pico, etc.).</p> <p>Microgranulares (Ex. Mina de Carajás).</p> <p>Magnéticas (Ex. Mina de C. Feijão, etc.).</p> <p>Goethíticas (Ex. Minas de Alegria, Capanema, etc.).</p>
0,3 mm ou 0,2 mm	<p>Aderentes</p> <p>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 <i>sinter</i> formado.</p>	
0,105 mm	<p>Superfinas</p> <p>São partículas de <i>pellet feed</i>. Sua participação no <i>sinter feed</i> deve ser minimizada. Contribuem fortemente para diminuir permeabilidade do leito a sinterizar. A alumina nessa fração aumenta o RDI (<i>Reduction Degradation Index</i>) do <i>sinter</i>.</p>	

Fonte: Ishikawa (1982).

Para Mourão (2007) a composição química do *sinter feed* na mistura que será sinterizado provém da parcela de *sinter* existente na carga metálica do alto-forno, da quantidade e a espécie de escória que se almeja alcançar na fabricação do ferro gusa e de sua qualidade.

Basicamente os limites de caráter químico dos minérios consistem aos teores de fósforo, sílica e alumina. Normalmente, os minérios de ferro brasileiros apresentam baixos teores de enxofre, titânio e álcalis (HONORATO, 2005).

Evita-se o uso de minérios que tenham concentrações mais elevadas em sílica nas

parcelas mais grossas, já que neste caso nem toda a sílica envolve-se nas reações, diminuindo o volume da escória e tornando o sínter mais débil.

Nas reações de sinterização, a atuação da alumina detectada nas frações mais grossas é quase inexistente. A dificuldade acontece quando a alumina se acumula às frações mais finas e coopera intensamente nas reações de sinterização, desfazendo-se na rede da hematita secundária. Estas reações debilitam o sínter por conta do aumento do RDI, gerando mais finos durante a redução (ISHIKAWA, 1982).

Adições de magnetita, MgO e CaO no leito de sinterização, podem amenizar os efeitos negativos da alumina. Estas adições melhoram as propriedades do sínter durante a redução, ou seja, diminui o RDI do sínter, conseqüentemente reduz a geração de finos durante a redução (LU; HOLMES; MANUEL, 2007).

Honorato (2005) comenta que devido às contrariedades causadas pelo fósforo nos altos-fornos, este elemento é limitado na produção do sínter. O fósforo tem baixa taxa de eliminação por meio da escória do alto forno e prejudica a fabricação de aços mais nobres.

2.1.2 Moinha de Carvão Vegetal (Combustível)

Para Honorato (2005), os combustíveis são aplicados no processo de sinterização com o objetivo de fornecer energia para aguentar a frente de queima no leito de sinterização, onde o material que queima sob condições próprias, em contato com o ar, criando calor, e para exercer a ignição do processo.

Já para o Takehara (2004), o combustível para a sinterização precisa ter elevado poder calorífico, sendo posta comumente à moinha de coque.

De acordo com a visão de Sugawara (1981), para a sinterização, há dois combustíveis que são empregues com objetivos diferentes:

- Combustível gasoso (Gás de Coqueria, Alto-forno ou Natural) ou líquido (Óleo): esse tipo de combustível é queimado no forno de ignição, com quantidade de ar, para abrasar o combustível sólido existente na mistura, estimulando o processo de sinterização.
- Combustível sólido (Coque Metalúrgico, Coque de Petróleo, Antracito e Carvão Vegetal): esse combustível é parte complementar do leito de sinterização e possui a finalidade de queimar-se em presença de ar. Além de prover o calor essencial ao processo, tem por efeito instigar uma permeabilidade equilibrada no seio da mistura

em estado de semi-fusão, causando vários poros à medida que se queima.

Nas usinas de pequeno porte, que operam fornos a carvão vegetal, restam finos do combustível. Sendo assim, é feito um reaproveitamento destes finos com o fim de substituir o coque (OYAMA; SATO; TAKEDA, 2005).

Na queima, frequentemente usa-se combustíveis líquidos ou gasosos. Na maioria, os combustíveis provenientes de processos industriais paralelos com o gás de coqueria ou alto-forno, são aproveitados e também podem ser empregados com óleos ou gás natural (Mourão, 2007).

Segundo Umadevi et al., (2008), o tamanho das partículas do combustível intervém na porosidade, nas fases formadas, na redutibilidade e resistência do sinter. Os maiores tamanhos de partículas de coque expandem o RDI do sinter, por conta do maior tamanho de poros formados, isto é, o sinter cria finos com facilidade durante a redução. Por outro lado, a expansão da quantidade de poros aumenta o RI (índice de redutibilidade) do sinter. Por isso, o combustível não deve conter muitos finos, para poder evitar a formação de sínteres com baixo RI, e nem muitos grossos, para não gerar sínteres frágeis.

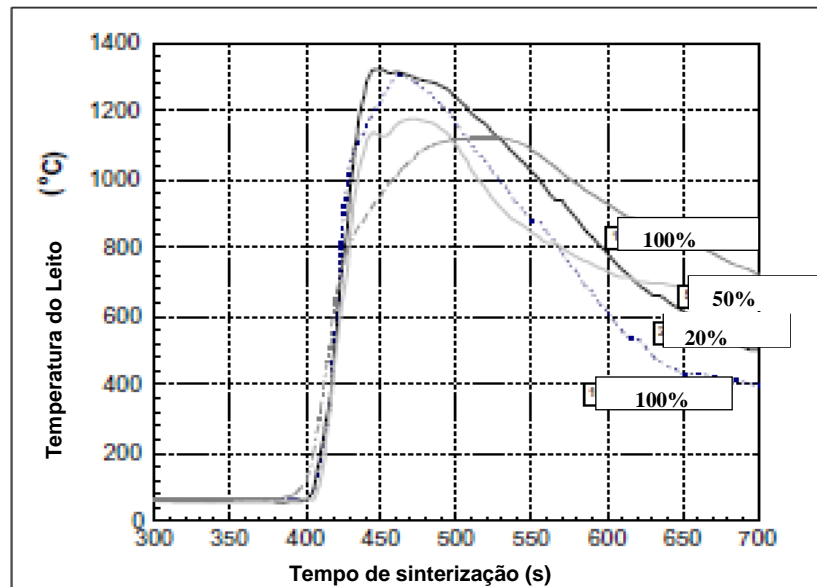
Ooi (2011) relata que coque é uma matéria-prima mineral e sua retirada causa estragos imutáveis no solo, já o carvão vegetal é conseguido por meio da carbonização da madeira. Assim, as lesões causadas pela extração da madeira podem ser reduzidas mediante técnicas de remediação e reflorestamento.

E a combustão de coques nos projetos de sinterização colabora para a criação de gases motivadores do efeito estufa, e também SO_x e NO_x . Já o carvão vegetal é pobre em enxofre e nitrogênio, o que limita as irradiações de gases relacionados a estes elementos no decorrer do processo de combustão. Este combustível tem o benefício de ser renovável, permitindo que as emissões de CO_2 formadas através da sua produção sejam embargadas no decorrer do ciclo de vida da biomassa.

Combustíveis mais reagentes acelera a velocidade da irradiação de frete de combustão, aumentando a produtividade. Mas, os combustíveis mais reativos diminuem a resistência a frio do sinter (LOPES, 2012).

Através do gráfico de Lovel (2009), a diferença das temperaturas ao longo do processo de sinterização de misturas com acréscimo de carvão vegetal pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Temperatura do leito de sinterização em função do tempo de misturas com adições de carvão vegetal em substituição ao coque.



Fonte: Lovel (2009).

A mudança de coque pelo carvão vegetal reduz os picos de temperatura na sinterização. Combustíveis mais reativos que o coque expande o vínculo de CO/CO₂ no interior do leito de sinterização (TAKANO, 1970).

Além do mais, o carvão vegetal tem menor quantidade de carbono fixo e grande quantidade de materiais voláteis (LOVEL, 2009).

2.1.3 Fino de Calcário Calcítico (Fundente)

Os fundentes têm o papel fundamental de escorificar às impurezas inseridas na carga, pelos minérios e pelo combustível sólido, criando uma matriz de escória apta a promover a harmonia dos grãos dos minérios, com o intuito de possibilitar ao sínter uma resistência apropriada à sua aplicação no alto-forno.

Através da classificação feita por Honorato (2005), os fundentes se enquadram em:

- BÁSICOS: portadores de CaO e/ou MgO;
- ÁCIDOS: portadores de SiO₂ e/ou Al₂O₃.

E conforme as impurezas dos minérios sejam de natureza ácida ou básica, deve-se executar, respectivamente, com fundentes básicos ou ácidos, de modo a criar um sínter de basicidade conciliável com a marcha operacional do alto-forno.

Os fundentes mais essenciais utilizados em sinterização em torno de 0 a 3 mm e de

10 a 30 mm, conforme Machado (2006) 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);
- Quartzo (portador de SiO₂).

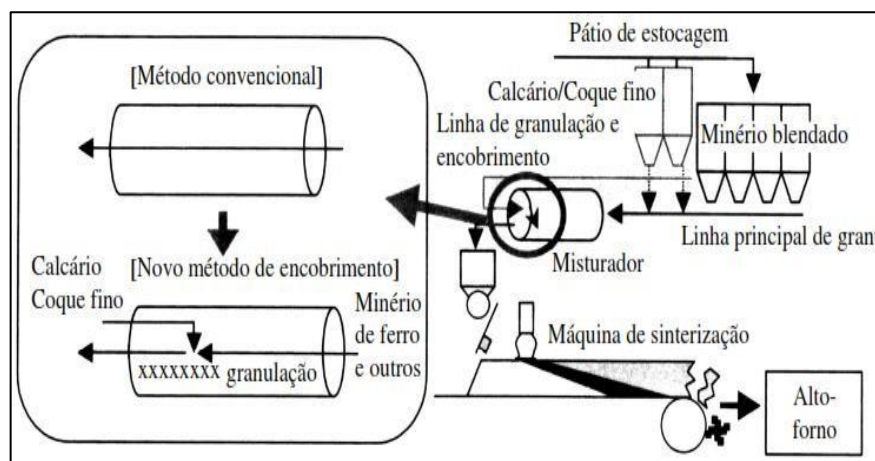
É normal determinar uma distinção entre fundentes e adições. As adições, quando empregues, exercem a correção de alguma característica da mistura ou para o reaproveitamento de escórias formadas na operação da usina. Alguns tipos de adições são: a carepa de laminação, o pó de alto-forno, a escória de alto-forno, o minério de manganês e etc. Esses materiais, fundentes e adições, precisam integrar-se completamente ao sinter e é vital que mostrem características físicas e químicas que propiciem sua aplicação (HONORATO, 2005).

Com a visão de Oyama, Sato e Takeda (2005) e de Honorato (2005) em apresentar os resultados apontando a importância da adequação granulométrica exata do fundente, o calcário, de tal forma que sua atuação na granulação, seja capaz de propiciar ao sinter uma melhor estrutura, com ganhos nas propriedades metalúrgicas do produto.

Ainda neste estudo, os autores aconselham a alteração do modo de dosagem do calcário juntamente com o combustível no misturador da sinterização, modificando as características das quase partículas formadas.

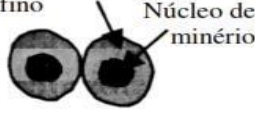


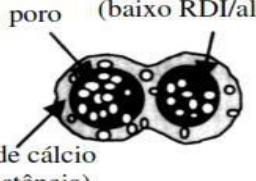
A seguir, as Figuras 4 e 5 apresentam uma melhor percepção desta modificação.

Figura 4 - Demonstração da modificação de dosagem do calcário e combustível.



Fonte: Oyama, Sato e Takeda (2005).

Figura 5 - Estrutura da quase partícula e do sínter com a nova forma de granulação apresentada.

	Método convencional	Novo Método de Granulação
Estrutura da quase partícula	Fino de minério/Calcário/ Coque fino  Núcleo de minério	Calcário/Coque fino  Minério fino Núcleo de minério
Estrutura do Sínter	Microporo  Hematita secundária (alto RDI) Ferritos de cálcio (alta resistência)	Microporo  Hematita primária (baixo RDI/alto RI)

Fonte: Oyama, Sato e Takeda (2005).

A hematita primária é a hematita original, restante dos minérios hematíticos, relativamente integrada na sinterização, e a hematita secundária foram geradas por mecanismos diferentes no decorrer do processo de sinterização, como: precipitação direta da fase líquida, oxidação da magnetita ou pela separação dos cristais externos das partículas de minério de ferro. Este tipo de hematita aparece basicamente rodeando pequenas porções de hematitas primárias e ao redor dos poros internos do sínter, obtendo uma fase vítrea (MUKHERJEE, 1985).

2.2 Processos de Aglomeração

De acordo com a ideia de Pietsch (2003), a aglomeração é a junção de sólidos particulados por conta das forças físicas de curto alcance e forças químicas entre as próprias partículas. Para que ocorra o processamento dos resíduos é essencial à aglomeração dos mesmos, tornando-os corpos coesos através de mecanismos físico-químicos na junção rígida das partículas entre si, com o objetivo de alcançar o tamanho e a forma apropriada para o uso na produção de aço.

O procedimento da aglomeração de minérios destina-se a verificar as cargas a serem alimentadas no alto forno, composto basicamente por minérios de ferro e fundentes, possuindo uma forma adequada e resistência mecânica apropriada para o percurso descendente dessa carga no alto forno com a percolação de gases através da carga.

Os métodos de redução que acontecem no alto forno não precisam ser classificados exatamente como reações de gás-sólido, pois podem contornar a chegada de uma fase líquida (como no caso da sinterização), estabelecendo assim uma categoria mista à parte, que também

envolve fases líquidas.

Conforme Mourão (2008) explica, durante as primeiras décadas do século XX, para o desempenho dos altos-fornos, muitas tentativas e investimentos que foram realizados através de pesquisas e rotas inovadoras, por vezes de forma drástica para o tratamento de finos de minério, nenhuma delas foi aprovada e consagrada em caráter industrial.

Os finos de minério de ferro não devem ser aplicados diretamente no alto-forno, por conta do processo de contracorrente, onde os sólidos descem contra o fluxo gasoso ascendente. Portanto, grandes avanços foram realizados na preparação do minério de ferro, através da aglomeração, onde possui três principais tipos que serão comentados a seguir.

2.2.1 Briquetagem

Segundo Lemos (2015), é a forma de aglomeração das partículas através de uma pressão mecânica imposta sobre a matéria-prima, onde é obtido um produto compactado, chamado de briquete. Este processo permite a reciclagem de materiais, especificamente resíduos siderúrgicos, que podem ser reaproveitados dentro da usina de produção de aço.

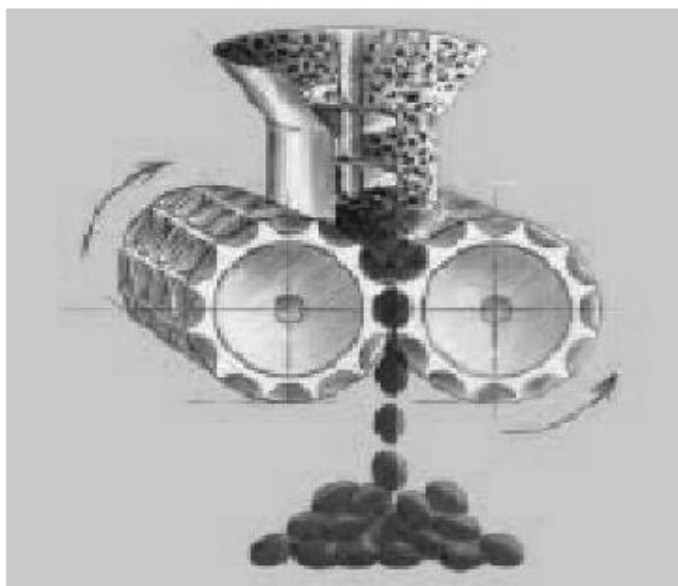
Fontes et al., (1989) relata a briquetagem como um método que consiste no ato de pressionar uma massa de partículas, com ou sem o acréscimo de ligante, e com ou sem tratamento térmico subsequente. Este processo abrange força coesiva entre os sólidos, aderência do ligante, comportamento reológico do conjunto partícula-ligante e, basicamente, propriedades físicas das partículas e química de superfície.

Então se entende que briquetagem é o processo de aglomeração de pequenos fragmentos de material sólido mediante a uma pressão que molda o produto de forma compacta em maiores dimensões e com parâmetros mecânicos definidos. Assim, os materiais briquetados podem ser empilhados facilitando o transporte e armazenamento.

De acordo com o autor Rocha (2007), os aglomerados devem possuir resistência a sua manipulação, armazenamento e utilidade no processo de alimentação dos altos-fornos. Há outros fatores que induzem essa resistência, por exemplo, a pressão de briquetagem, o teor dos ligantes, umidade, temperatura e o tempo de cura.

O que determina os critérios de escolha do melhor método de briquetagem é a função de produtividade, consumo de energia e os custos de investimento. Na Figura 6 podemos observar um exemplo de briquetagem utilizando a compressão em prensa de rolos, um dos métodos mais utilizados e eficazes existentes quando se trata de briquetagem.

Figura 6 – Briquetagem por compressão em rolos.



Fonte: Köpern (2017).

Na briquetagem as bases de conformação de briquetes são usadas para briquetar o minério lentamente, normalmente em compactação a frio, o que ocasiona uma baixa produtividade, dificultando a utilização desse processo em alto forno, principalmente quando se exige uma grande demanda. Apesar disso, a briquetagem é empregada para aglomerar finos industriais (poeiras, lamas e resíduos).

Exemplos de aplicação da briquetagem:

- a) Obtenção de briquetes (de finos) para operar na aciaria em vez de usar sucata na carga;
- b) Obtenção de briquetes de “coque” de carvões não coqueificados;
- c) Briqueta-se finos de minério de ferro esponja para diminuir a reatividade (oxidação) e facilitar o transporte do mesmo.

2.2.2 Pelotização

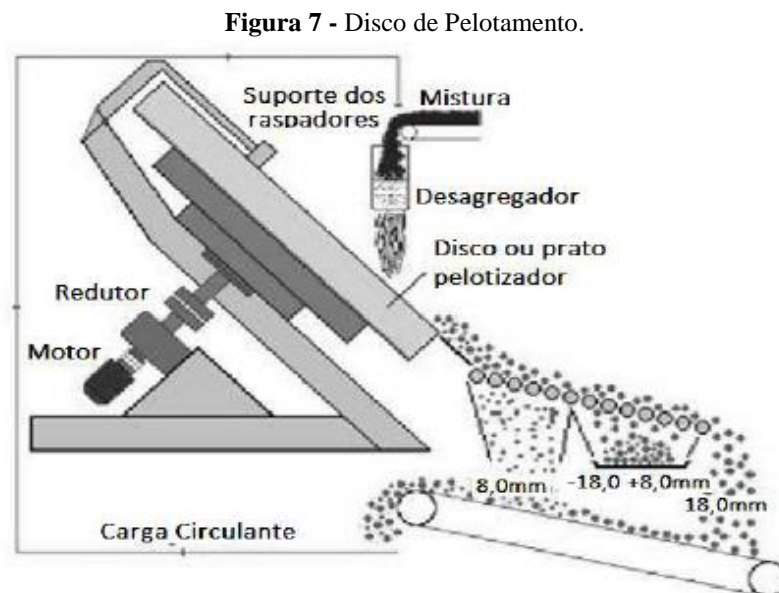
Segundo Silva (2010), as pelotas são agregados de finos de minério de ferro conhecidos como *pellet feed* e são formados na lavra. Acompanhado do sinter e o minério granulado, as pelotas são as principais fontes de abastecimento dos fornos de redução para a aquisição do ferro primário.

As técnicas de lavra, classificação, manuseio e transporte de minério de ferro criam uma grande quantidade de partículas finas e ultrafinas, cuja aplicação direta na indústria siderúrgica é impraticável. Com a finalidade de possibilitar o aproveitamento dos finos e

augmentar o rendimento de suas minas, mineradoras passaram a integrar essas partículas em pelotas, com dimensionamento e características de qualidade que facilitassem seu uso direto nos altos-fornos.

Campos e Fonseca (2010), afirmam que o processo de pelletização baseia-se na mistura úmida de finos de minério de ferro aglomerados na fração menor que 0,149 mm com quantidades estabelecidas de aglomerante, óxidos básicos, e energéticos, seguida de rolamento em disco ou tambor, que pela ação da tensão superficial de capilaridade, propicia a formação de um aglomerado esférico de tamanho entre 8 e 18 mm, as pelotas.

O processo de Pelotização é demonstrado na Figura 7, por meio do disco de pelotamento, conforme Fonseca (2003).



Fonte: Fonseca (2003).

Após serem expostas a um tratamento térmico específico, mostram alta resistência mecânica ao manejo e propriedades metalúrgicas excepcionais quando sujeitas ao processo de redução.

A pelotização pode ser provedora da sinterização quando esta gera micropelotas cruas como matéria-prima no lugar do “*sinter feed*” para a nucleação com o fim de tornar a mistura permeável deixando a homogeneidade no leito. Um dos principais padrões que garante esta homogeneização é o grau de umidade, conforme TAKEHARA (2004).

2.2.3 Sinterização

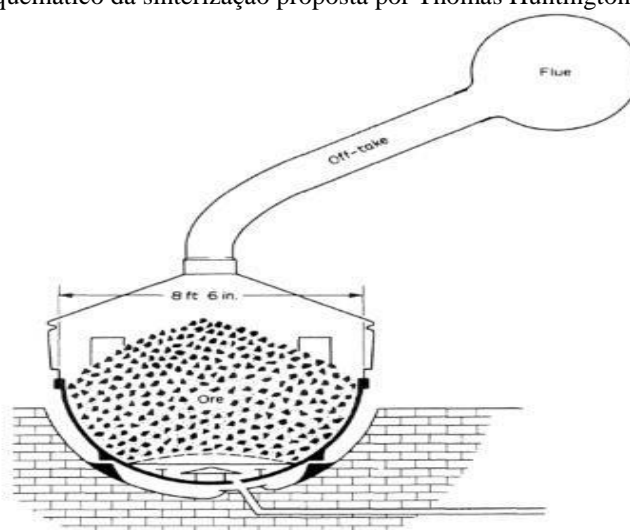
A sinterização do minério de ferro é um processo de aglomeração de partículas minerais em um bloco poroso, pela fusão incipiente, produzida pelo calor resultante da queima de combustível a ela inserido (BALL, D.F et al., 1973).

O primeiro equipamento industrial de sinterização foi criado por volta de 1890, onde finos de minérios misturados com combustível eram conduzidos a um leito de carvão dentro de um recipiente, o ar forçado contra a camada provocou a sinterização do leito (BALL, D.F et al., 1973).

Em 1897, na Inglaterra, Thomas Huntington e Fherberlein com o objetivo oxidar e aglomerar os minérios obteve uma patente para a ustulação de minério de chumbo contendo enxofre em uma grelha descontínua, através da queima do carvão de madeira e soprando o ar de combustão de baixo para cima. (ARAUJO, L. A, 1997).

A Figura 8 apresenta um desenho esquemático da sinterização proposta por Thomas Huntington e Fherberlein.

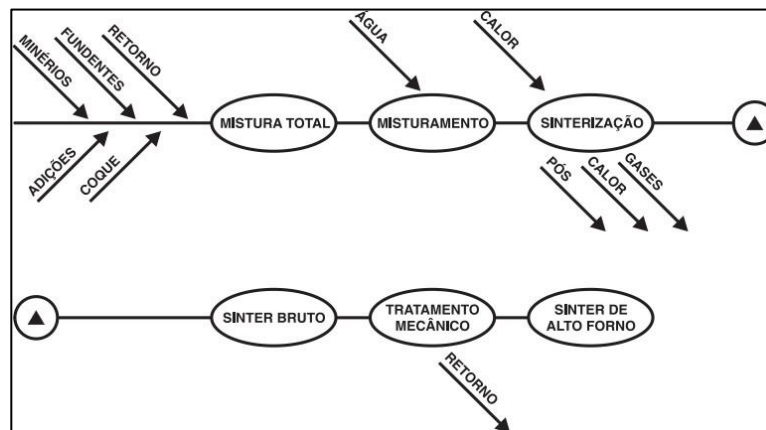
Figura 8 – Desenho esquemático da sinterização proposta por Thomas Huntington e Fherberlein.



Fonte: Ball et al.; (1973).

Segundo Najjar e Santos (1981), a sinterização é composta com finos de minérios de ferro, moinha de carvão vegetal, fundentes e adições, cujo produto, o sinter, exhibe características químicas, físicas metalúrgicas compatíveis com as solicitações do alto-forno. O processo de sinterização pode ser definido conforme Figura 9.

Figura 9 - Fluxo esquemático do processo de sinterização.



Fonte: Najjar e Santos (1981).

Ainda de acordo com os autores, os sínteres podem ser definidos como:

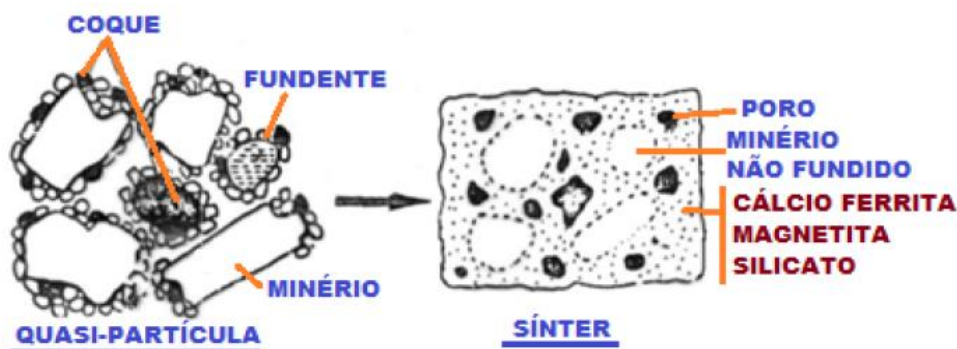
- **NÃO AUTO-FUNDENTE:** Quando é oriundo de minério hematítico ou magnetítico com estéril de sílica e ao qual não é acrescido por nenhuma base (CaO ou MgO);
- **AUTO-FUNDENTE:** O minério pode ser o mesmo que o anterior. Mas, são incluídas algumas bases para a reparação da composição química. Podem ser usados os ácidos, quando a relação CaO/SiO for inferior a 1, ou básico, quando a relação for superior a 1.

Segundo Honorato (2005), as principais características indicadas para o sínter são:

- Sem elementos químicos indesejáveis para o alto forno (ex.: zinco);
- Composição química constante;
- Alto teor de ferro;
- Baixo volume de escória;
- Alta resistência mecânica;
- Granulometria adequada;
- Baixa porcentagem de finos;
- Baixa degradação sob redução;
- Grande redutibilidade;
- Reduzido consumo de combustível.

Na sinterização dos coprodutos com granulção fina são comprimidos, convertendo-se em corpos coesos mediante mecanismos físico-químicos quando sujeitos a altas temperaturas, um pouco menor que a temperatura de fusão, pois a intenção é criar uma matéria-prima aglomerada, o sínter, com dimensões e formas adequadas ao processo, como pode ser demonstrado na Figura 10.

Figura 10 - Esquema simplificado do processo de sinterização para a obtenção do sinter.



Fonte: USP (2013).

Quando é produzido somente com minério de ferro, o sinter exibe baixa redutibilidade por conta da alta quantidade de “*fayalita*”, provinda da sílica da ganga de minério, sendo essencial o abastecimento direto no forno de cal e quartzo com o inconveniente do aumento do consumo de coque. Assim, a aplicação de fundentes na mistura do sinter é uma melhoria na redução do consumo de coque do alto forno.

Por isso é preciso observar as análises químicas e físicas do produto e as condições técnicas como a determinação da resistência necessária do sinter, ou seja: a temperatura do processo, velocidade e a taxa de resfriamento, aplicação de aglutinante, umidade da mistura, forma e o tamanho do sinter.

Entre as matérias primas usadas na sinterização o “*sinter feed*” é a mistura de diferentes tipos de minérios de ferro sendo: hematita (Fe_2O_3), limonita ($\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), magnetita (Fe_3O_4) e siderita (FeCO_3), e é necessário observar as características do tipo: poder de aglomeração a frio, porosidade, forma de grão, crepitação, densidade, e a granulometria que precisa variar entre 0% de fração $> 10,0$ mm, 45% a 60% da fração de 1 a 10,0 mm, e menor de 15% da fração < 200 mesh. (MACHADO, 2006).

2.3 Equipamentos de Sinterização

A primeira rota, em menor escala, considera o processo de sinterização em batelada, sendo a mais famosa, cujo layout foi projetado por J.E Greenwalt nos Estados Unidos.

A segunda rota considera o processo contínuo de sinterização, que foi desenvolvido entre 1903 a 1906 por Dwight e Lloyd no México para a sinterização de cobre. Após algumas plantas com o layout similar, foram construídas para a sinterização de minério de ferro (BALL et al., 1973).

E o reator vertical de leito fixo que constitui importantes sistemas da engenharia química, com muitos destinos em vários processos industriais, especialmente na área das indústrias de refino do petróleo e petroquímica.

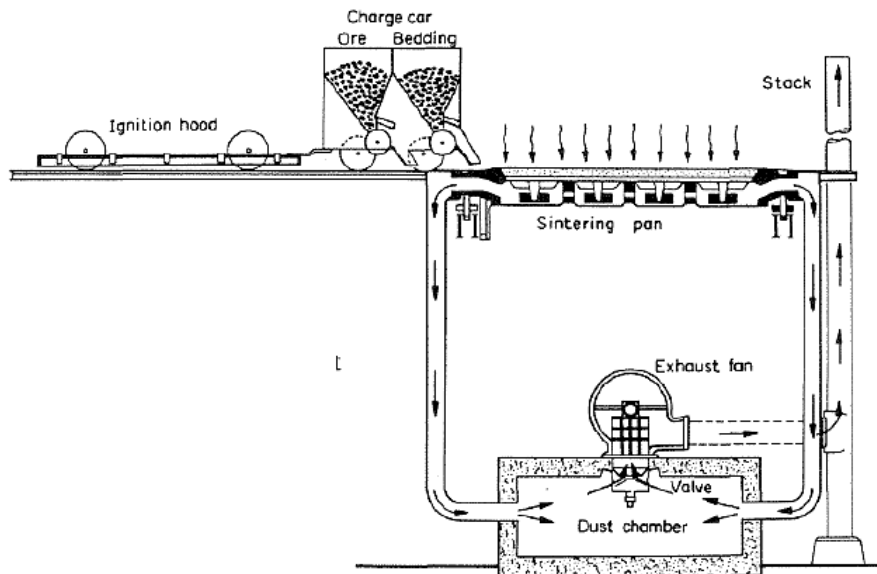
2.3.1 Greenawalt – batelada

A mistura de sinterização é abastecida na parte superior do equipamento. Após o carregamento é ativado os queimadores. Quando a ignição se completa, o queimador é afastado e ar é succionado ao longo do leito até a finalização da sinterização. A maior restrição desta rota é a expansão da máquina de sínter dada à necessidade de se ganhar uniformidade na ignição (BALL, D.F et al., 1973).

Prós: Baixo custo de instalação, incomplexidade de manutenção com o equipamento em funcionamento e forno de ignição móvel.

Contras: Baixa eficiência, complexidade no aumento do leito e para manter a uniformidade na ignição.

A Figura 11 mostra um desenho esquemático do layout da máquina de sínter desenvolvida por Greenawalt.

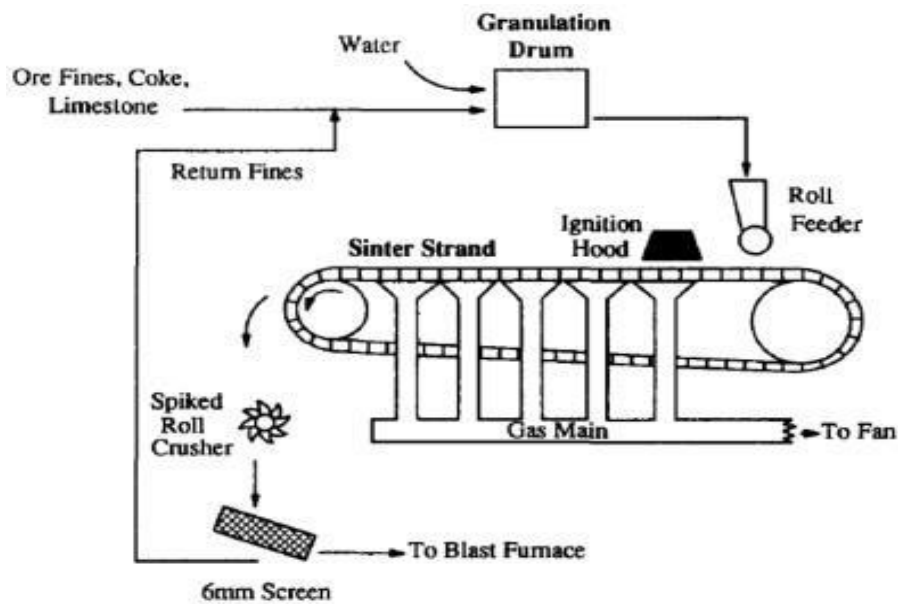


Fonte: Ball et al., (1973).

2.3.2 Dwight Lloyd – contínuo

Para Ball et al., (1973), a característica fundamental desta rota de sinterização é a grelha móvel. Na parte de baixo da grelha há um sistema de exaustão que succiona o ar quente, após a combustão, ao longo da camada de mistura, causando a sinterização do leito. A Figura 12 apresenta um desenho esquemático do layout da máquina de sínter desenvolvida por Dwight-Lloyd.

Figura 12 - Desenho esquemático da sinterização feito por Dwight-Lloyd.



Fonte: Hinkley et al., (1994).

Prós: Grande eficiência, combustão constante e facilidade no aumento na altura do leito.

Contras: Elevado custo de instalação, dificuldade de manutenção com o aparato em funcionamento.

Somente após 1940 o processo de sinterização começou a ser estudado científico e fundamentalmente. A partir disso, importantes desenvolvimentos deste processo vêm sendo alcançado. Hoje em dia as máquinas de sinterização contínua são usadas em larga escala.

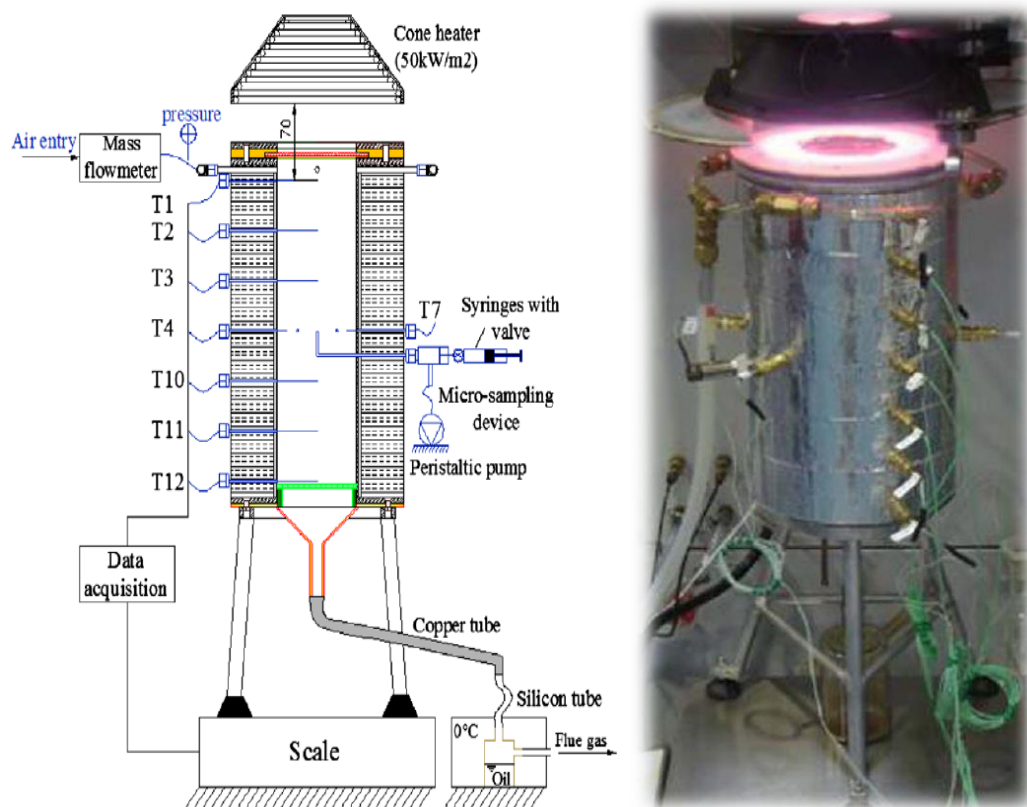
2.3.3 Reator Vertical de Leito Fixo

Os reatores de leito fixo constituem-se em colunas com base perfurada, querendo à aeração do sistema, conseguindo obter uma camisa com circulação de água, para possibilitar o controle de temperatura (LAURENTINO, 2007).

Atualmente a aplicação dos reatores de leito fixo é bem extensa, sendo os mesmos vistos na indústria química de base, na indústria petroquímica e na indústria de refino do petróleo.

Baseado no trabalho desenvolvido por Martins et al., (2010), o equipamento foi elaborado para deixar o processo de combustão em escoamento unidimensional, sendo formado por uma câmara de combustão cilíndrica vertical de aproximadamente 158 mm de diâmetro interno e uma altura de 700 mm. O diâmetro foi adotado para ser grande o suficiente para abalazar as perdas de calor por meio das paredes, mas também estreito o suficiente para impedir o uso de grandes quantidades de material a ser sinterizado. A Figura 13 apresenta o projeto esquemático e o funcionamento real do reator de leito fixo.

Figura 13 - Desenho esquemático e de funcionamento do reator de leito fixo.



Fonte: Martins et al.; (2010).

O leito fixo foi fabricado em aço carbono de 3,2 mm de espessura, entre a câmara de combustão e o cilindro vertical externo de 164 mm de diâmetro. Foi inserida a lã de rocha com o intuito de ser usada como isolante térmico. Uma grelha de aço carbono foi colocada na parte de baixo da câmara, apoiada por um tubo interno.

No decorrer da área vertical do reator, sete termopares são postos nos furos

posicionados em diferentes alturas para medir a temperatura durante a combustão. Além dos sete termopares, um termopar foi incluído para medir a temperatura da parede do cilindro externo e outro no tubo interno na região inferior ao reator para medir a temperatura dos gases de combustão, como demonstra a Figura 13, anteriormente.

A propagação da combustão no reator de leito fixo pode ocorrer em duas situações:

- Combustão em contracorrente (ou combustão oposta): onde a frente de ignição e a alimentação do ar primário ocorrem em lados opostos do lote de combustível. O suprimento de ar em contracorrente é normalmente encontrado em processos de combustão em leito fixo. A aplicação típica da combustão contracorrente é a incineração de RSU (resíduos sólidos urbanos) (RYU et al., 2006).
- A combustão em co-corrente (ou combustão direta), tanto a frente de combustão quanto a alimentação de ar primário, ocorrem no mesmo lado da célula de combustão (WANG; CHAO; KONG, 2003).

Este último caso é utilizado neste trabalho. O melhor exemplo de combustão em co-corrente pode ser encontrado na combustão para a recuperação de petróleo (CASTANIER; BRIGHAM, 2003).

2.4 Reações na Sinterização

Para Dawson (1993), as reações a seguir acontecem na criação do sinter de minério de ferro:

- Reações em estado sólido: sólido-sólido e sólido-gás;
- Fusão dos produtos das reações em estado sólido para criar o líquido primário;
- Desagregação dos sólidos na porção fundida para produzir o líquido secundário;
- Recristalização das fases minerais a partir dos líquidos gerados.

As principais reações e processos que decorrem na sinterização são apresentados nas Equações de 1 a 14.

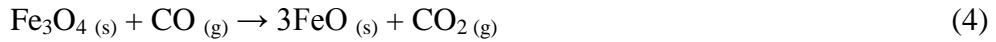
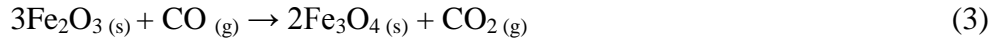
- a) Secagem: até 300°C - vaporização da água livre.



- b) Desidratação: 400 a 500°C - vaporização da água combinada



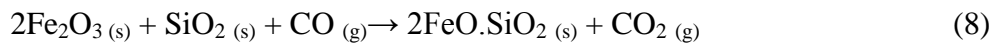
c) Redução superficial do minério de ferro



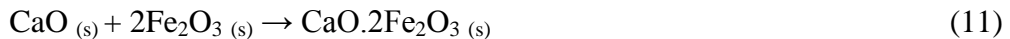
d) Decomposição de carbonatos: 600 a 1150°C



e) Formação de silicatos: 600 a 1300°C



f) Formação de Cálcio-ferritas: 1100°C



g) Combustão do Coque: 1300°C



h) Formação da magnetita:



O processo é completado quando a temperatura diminui para abaixo de 1100°C, apesar de que alguma oxidação de wustita ou magnetita possa ainda acontecer.

2.5 Caracterização Físico-Química do Sínter

Para compreender um material é essencial que seja feita a sua caracterização físico-química para conhecer sua natureza química, física e mineralógica.

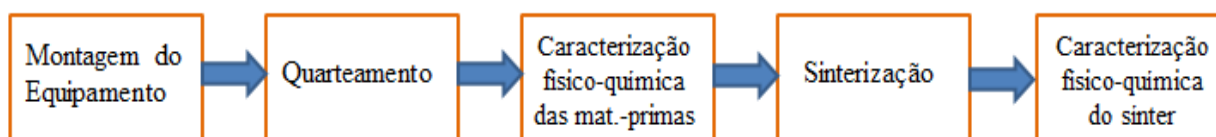
Portanto, para a caracterização dos sínteres produzidos, foram analisados qualitativamente através do EDS, morfológicamente através do MEV, mineralogicamente por DRX, a composição química dos óxidos majoritários por FRX, análise granulométrica por peneiramento e o teste de tamboreamento (tumbler test) para determinar a resistência à abrasão do sínter.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Condições para o Processo de Sinterização

Para que os objetivos do trabalho fossem atendidos de forma clara e objetiva foi elaborado o fluxograma, Figura 14, das etapas utilizadas nos testes de sinterização dos materiais para a conclusão do trabalho.

Figura 14 - Fluxograma das etapas do experimento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.1.1 Montagem do equipamento

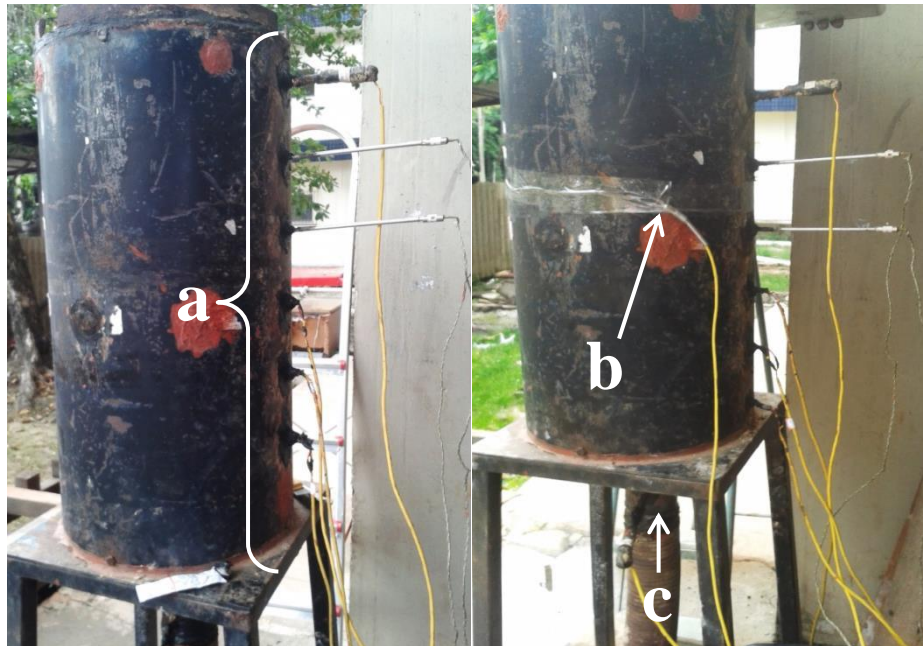
O reator de leito fixo usado para a sinterização dos finos de minério de ferro, Figura 15, é um aparato experimental adaptado baseado do trabalho desenvolvido por Martins (2008) na Universidade de Toulouse. O equipamento foi projetado e produzido na Usina de Materiais da Faculdade de Engenharia Química – UFPA e depois foi fabricado em uma oficina metalúrgica contratada.

Para a realização do experimento, foram verificados os seguintes itens do processo para que facilitasse a sua operação:

- Aparelho de aquisição de dados de temperatura;
- Anemômetro; caixa de vento;
- Câmara de sinterização;
- Duto de exaustão;
- Grelha;
- Mecanismo de ignição;
- Motor exaustor;
- Termopares;
- Vedação eficiente.

O reator contém 7 posições verticais para a colocação de termopares, 1 termopar na posição externa ao redor do reator e 1 termopar na parte inferior do reator, conforme a Figura 15 indica.

Figura 15 - Reator vertical de leito fixo, a) 7 termopares verticais, b) 1 termopar externo ao redor do reator e c) 1 termopar externo na parte inferior.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Os termopares (os dois primeiros, a partir da parte superior do reator, são do tipo K e os demais do tipo S) foram postos nos furos localizados em diferentes alturas para avaliar a temperatura ao longo do eixo da câmara de combustão, Figura 15a.

Para medir a temperatura da parede externa do cilindro (Figura 15b), foi acrescentado um termopar do tipo K e outro, do tipo K também, foi colocado no duto de saída (Figura 15c) na região inferior abaixo da grelha da câmara de combustão para aferir a temperatura dos gases de saída do processo de sinterização.

Os termopares do tipo S, por suportarem temperaturas mais elevadas que os do tipo K, foram introduzidos nas posições onde possivelmente se dariam as reações de sinterização que contribuiriam com o aporte térmico, produzindo temperaturas mais elevadas nessas regiões em função do aumento de energia térmica oriundo dessas reações.

Todos os termopares foram vedados com argila umedecida com água e adesivo de silicone para motor, para que não houvesse nenhuma entrada falsa de ar (Figura 16).

Figura 16 - Vedação dos termopares com argila umedecida e adesivo de silicone, respectivamente.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

O reator teve como base para sua construção o fato de que deveria ter combustão em co-corrente e unidimensional. O equipamento possui uma câmara de combustão cilíndrica com diâmetro de 158 mm e altura de 700 mm, o diâmetro externo do reator escolhido foi de 164 mm, e foi confeccionado em aço carbono de 1/8'' de espessura.

A Figura 17 ilustra que entre a câmara de combustão e a parede externa do reator, foram inseridas lã de rocha e vermiculita, que serviu como material refratário, pois o calor liberado no decorrer do processo de sinterização, a vermiculita expande e atua como uma camada isolante, evitando perdas térmicas radialmente.

Figura 17 - Câmara de isolamento do reator.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

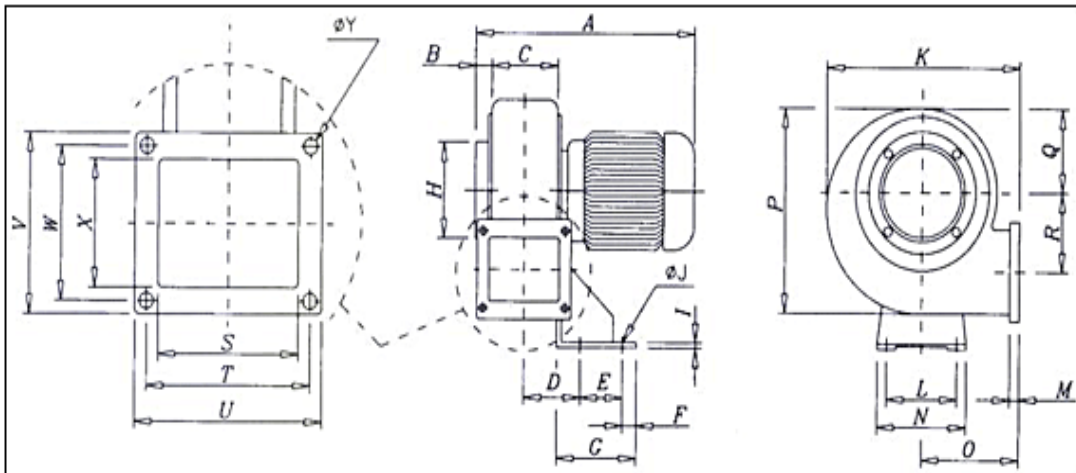
Uma grelha de aço carbono (Figura 18) foi instalada na parte inferior da câmara com o objetivo de reter o material micropelotizado e dar passagem aos gases da combustão, cujo fluxo de ar no interior do reator era forçado através de um exaustor centrífugo do tipo siroco (Figura 19), acoplado a base debaixo da grelha do reator através de um duto de exaustão de aço flexível de aproximadamente 1,5 m de comprimento, que é responsável por conduzir os gases gerados na sinterização até o motor exaustor.

Figura 18 – Grelha de aço carbono.



Fonte: Alves, (2017).

Figura 19 - Exaustor.



Fonte: (<http://www.ventbras.com.br/produtos.php?id=1&categ=1>, 2015).

Para verificar a velocidade do ar que seria succionado para dentro do reator quando o exaustor começasse a trabalhar, foi utilizado o anemômetro (Figura 20).

Figura 20 - Anemômetro.

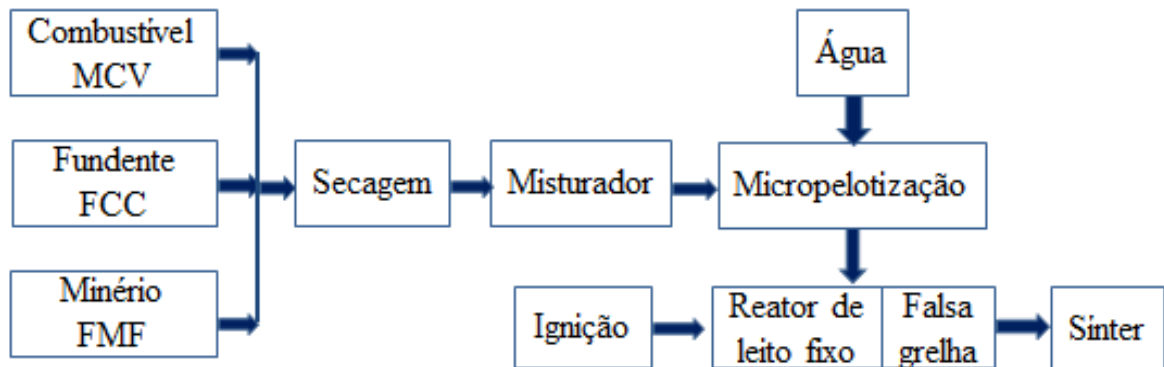


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.1.2 Simulação física do processo de sinterização

Para facilitar o entendimento da metodologia realizada nesta etapa do trabalho, o fluxograma na Figura 21 apresenta as principais fases.

Figura 21 - Fluxograma para o processo de sinterização do sínter.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Como o sinterizador já havia sido utilizado para um experimento anterior, não houve a necessidade de exercer um teste antes de realizar o primeiro experimento da produção do Sínter, mas antes de ser abastecido com o material no leito, foi averiguada a funcionalidade do sinterizador, verificando o fluxo de ar (visualmente), sucção de ar pelo exaustor, ação de queima com o maçarico e os termopares, para ver suas sensibilidades às temperaturas.

3.2.2.1 Sistema de Ignição

A ignição do combustível foi realizada por um maçarico fixado, fornecendo chama

regulável, acima e no meio do diâmetro da câmara de combustão, na entrada da mistura a sinterizar, por meio de uma mangueira de pressão acoplada ao gás liquefeito (GLP) de petróleo, dando início ao experimento (Figura 22).

Figura 22 - Sistema de ignição com o maçarico na região superior do reator de leito fixo.

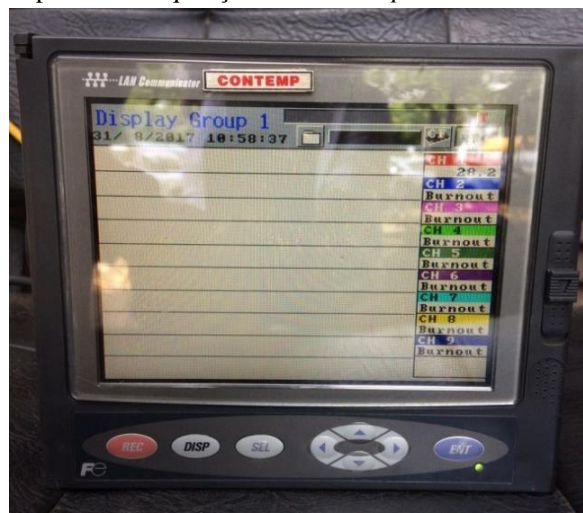


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.2.2.2 Aparelho de Aquisição de Dados de Temperatura

Os dados da evolução de temperatura da frente de combustão foram conseguidos mediante os nove termopares conectados, sendo sete posições na câmara de combustão, um ao redor do leito e outro na parte inferior da grelha, cujas variações foram gravadas pelo aparelho de aquisição de dados de temperatura, *Paperless Recorder*, conforme Figura 23.

Figura 23 - Aparelho de aquisição de dados *Paperless Recorder* do tipo PHL.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.2 Pré-Tratamento das Matérias-Primas

As matérias-primas foram cedidas pela empresa SINOBRAS, em Marabá a aproximadamente 500 km da cidade de Belém – PA, foram armazenados em recipientes com tampas rosqueáveis e em seguida transportada até a Usina de Materiais localizado no Campus da UFPA na cidade de Belém.

Após o recebimento das matérias primas, as mesmas foram submetidas a um pré-tratamento incluindo o quarteamento, além das caracterizações físicas e químicas, conforme as necessidades experimentais.

Os finos de minério de ferro (Figura 24) apresentaram umidade e deste modo foi necessário sua secagem a 105°C em estufa com recirculação de ar durante 24 h, para que fosse medida sua massa seca para a composição do leito de sinterização, conforme a Figura 14, abaixo. O material tem a granulometria compreendida entre 0,15 mm e 6,3 mm e é um material hematítico, proveniente do processo de produção do ferro gusa.

Figura 24 - Fino de minério de ferro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A moinha de carvão vegetal (Figura 25) funciona como combustível sólido no processo de sinterização e foi usado nos ensaios experimentais de duas formas: na mistura de composição para o sinter e no preenchimento do leito do reator de sinterização.

De forma similar, este material apresentou granulometria adequada para a carga do alto forno e umidade, então foi submetido à secagem, para medir a massa seca.

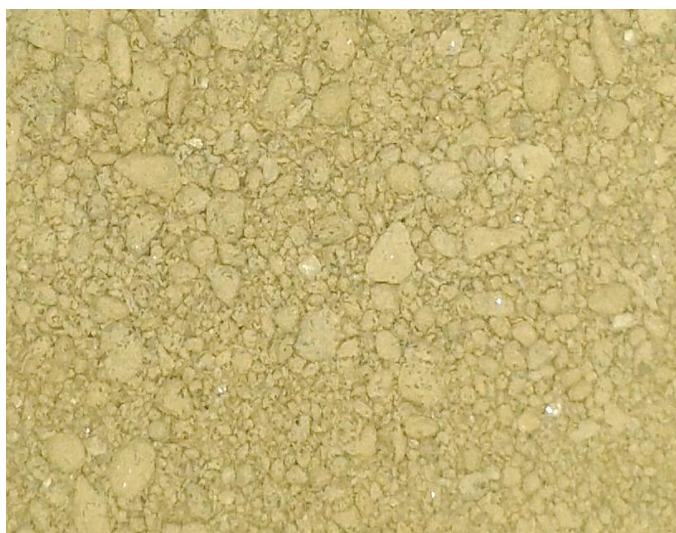
Figura 25 - Moinha de carvão vegetal.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

O fino de calcário calcítico (Figura 26) é usado como fundente para dar ao sínter uma resistência apropriada à sua aplicação no alto-forno no processo de sinterização, e também foi submetido ao mesmo processo de secagem e medido sua massa.

Figura 26 - Fino de calcário calcítico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.2.1 Análise granulométrica

A determinação da distribuição granulométrica das matérias-primas a sinterizar foi realizada através do processo de peneiramento em um conjunto de peneiras com malhas de 6,35 mm; 4,0 mm; 2,83 mm; 1,68 mm; 1,0 mm; 0,5 mm; 0,297 mm; 0,210 mm; 0,149 mm;

0,105 mm e 0,53 mm (Figura 27), baseado na norma ABNT NBR 7181: 2016 e NBR ISO 4701:2009.

Figura 27 - Peneiras de análise granulométrica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.2.2 Determinação do teor de umidade ótima

Este método determina a quantidade de água necessária para criar as micropelotas e consequentemente a menor densidade aparente, visto que este método é importante para os testes de sinterização.

Para a realização do processo, utilizaram-se os seguintes dados que são informados na Tabela 1, como a quantidade dos materiais em massa seca e úmida, teor de H₂O, peso e volume do recipiente e rotações do tambor de micropelotização.

Tabela 1 - Dados para a micropelotização da mistura.

Material	M. Úmida	M. Seca	g/% Umidade	Quant. Util.
FMF	1000 g	974,0 g	26 g - 2,6%	700 g
MCV	300 g	278,5 g	21,5 g - 7,16%	200 g
FCC	150 g	145,0 g	5 g - 3,33%	100 g
H ₂ O			1%	10 ml
Recipiente de vidro	212,5 g		Vol. de 305 cm ³	
Rotações pelotizador	1 (30 1/4 rpm), 2 (30 1/4 rpm), 3 (30 1/4 rpm) aprox. 34 rot/min			

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Inicialmente a mistura dos materiais é colocada no micropelotizador e a cada 5 minutos são acrescentados 1% de água para ajustar a umidade ideal com a ajuda de um pulverizador. Este procedimento é mostrado na Figura 28.

Figura 28 - Processo de micropelotização para determinar o teor de umidade ótima.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Após a pulverização da água uma amostra era recolhida em um vasilhame de vidro e após raspar seu excesso, o vasilhame com a amostra era pesado na balança analítica e seu conteúdo retornava ao micropelotizador para a continuação do processo.

Este processo foi repetido 60 vezes dividido entre 3 dias (20 amostras por dia) a cada percentual de água pulverizado, a fim de eliminar pontos fora da curva ocasionados por vibrações ou compactações do vasilhame.

Repetia-se este processo até encontrar o menor peso de material no vasilhame, ou seja, o menor ponto da curva ou a menor densidade aparente.

Para determinar o valor de massa específica aparente, usaram-se as três massas da amostra e tirou-se uma média entre os valores, o mesmo foi feito para a massa específica.

$$\text{Média} = (386,5+386+389)/3 = 387,2$$

$$\text{Média} = (1,267+1,266+1,275)/3 = 1,27 \approx \mathbf{1,3 \text{ g/cm}^3}$$

ou

$$M_{\text{esp.}} = \frac{\text{Massa}}{\text{Volume}} \quad (15)$$

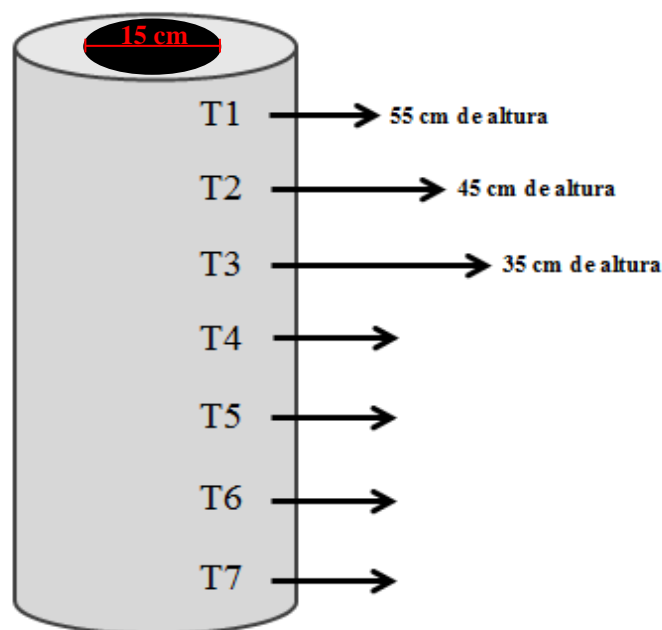
$$M_{\text{esp.}} = \frac{387,2}{305} = 1,27 \approx 1,3 \text{ g/cm}^3$$

3.2.3 Pesagem dos Materiais a Sinterizar e do Sínter Produzido

A pesagem dos materiais e do sinteres produzidos foram realizados em uma balança analítica e de piso com indicador digital, com capacidade para 3,5 kg e 500 kg, respectivamente.

Para calcular a quantidade exata de material que seria sinterizado em relação às três alturas (Figura 29), que é o propósito deste trabalho, utilizou-se a Equação 16 para encontrar o volume de carga para entrar no reator com a altura de 35 cm.

Figura 29 - Alturas do leito de sinterização.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

$$\text{Vol.} = \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \cdot h \quad (16)$$

$$\pi = 3,14$$

$$D^2 = \text{diâmetro} = 15 \text{ cm}$$

$$h = \text{altura do leito} = 35 \text{ cm}$$

Logo:

$$\text{Vol.} = \left(\frac{3,14 \cdot 15^2}{4} \right) \cdot 35 = \mathbf{6181,875 \text{ cm}^3}$$

Para saber a quantidade de carga que entrará no reator, usou-se a média das menores massas de teor de umidade ótima e dividiu pelo volume do vasilhame para assim obter a massa específica. Por fim, multiplicou o volume do reator pela massa específica, e obteve o valor total de carga, como indica a Equação 17.

$$M_{\text{esp.}} = \frac{\text{Massa}}{\text{Volume}} \quad (15)$$

$$M_{\text{esp.}} = \frac{387,2}{305} = 1,27 \approx \mathbf{1,3 \text{ g/cm}^3}$$

$$\text{Massa} = M_{\text{esp.}} \cdot \text{Vol do reat.} \quad (17)$$

1º Experimento – Sínter 1

Portanto, através destes dados, pode se obter a massa adequada a ser usada no processo, foi necessário multiplicar a massa específica pelo volume do reator inicialmente calculado (Equação 17).

$$\text{Massa} = 1,3 \text{ g/cm}^3 \times 6181,875 \text{ cm}^3 = \mathbf{8.036,4375}$$

Foi preferível arredondar a quantidade de material para a produção do primeiro sínter, sendo então de 8.040 kg em relação à altura de 35 cm dentro do leito de sinterização, como é demonstrado na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 - Valor mássico dos materiais para compor a mistura para produzir o primeiro sínter.

MATERIAL	% em MASSA	MASSA (g)	% MASSA ÚMIDA (g)
FMF	70	5.628	+ 10% = 9.567,6
MCV	20	1.608	+ 10% = 1.929,6
FCC	10	804	+ 10% = 884,4

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Obs.: para o 1º experimento com o 3º termopar (de cima para baixo), a altura do leito foi de 35 cm mais 8 cm para fazer o bedding (falsa grelha), totalizando 43 cm, mas os cálculos foram baseados na altura de 35 cm, devido ser a altura efetiva do leito.

Foi acrescentado para ao FMF, MCV e FCC as seguintes porcentagens de umidade como informa a Tabela 2, pois os materiais passaram pelo processo de secagem em uma

estufa com recirculação de ar por 24 horas à 105° C e perderam massa, visto que se quer obter o valor de massa inicial.

Massa seca:

FMF = 9.567,6 kg (Massa úmida) foi para 9.289,5 kg (Massa Seca);

MCV = 1.929,6 kg (Massa úmida) foi para 1.782 kg (Massa Seca);

FCC = 884,4 kg (Massa úmida) foi para 842,3 kg (Massa Seca).

2º Experimento – Sínter 2

Para calcular a quantidade de material que seria utilizado no segundo experimento, utilizou-se novamente a Equação 16 e 17 para encontrar a quantidade total de carga para entrar no reator com a altura de 45 cm (Figura 28).

$$\text{Vol.} = \left(\frac{3,14 \cdot 15^2}{4} \right) \cdot 45 = 7.948,125 \text{ cm}^3$$

$$\text{Massa total: } 1,3 \text{ g/cm}^3 \times 7.948,125 \text{ cm}^3 = 10.332,5625$$

O valor foi aproximado para 10.300 kg, para assim facilitar as medidas dos materiais que serão utilizados no processo, como demonstra a Tabela 3.

Tabela 3 - Valor mássico dos materiais para compor a mistura para produzir o segundo sínter.

MATERIAL	% em MASSA	MASSA (g)	% MASSA ÚMIDA (g)
FMF	70	7.210	+ 10% = 7.931
MCV	20	2.060	+ 10% = 2.266
FCC	10	1.030	+ 10% = 1.133

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Obs.: para o 2º experimento com o 2º termopar, a altura do leito foi de 45 cm mais 8 cm para fazer o bedding (falsa grelha), totalizando 53 cm, mas baseado na altura de 45 cm.

Foi acrescido para ao FMF, MCV e FCC as seguintes porcentagens de umidade como informa a Tabela 3, pois os materiais passaram pelo processo de secagem em uma estufa com recirculação de ar por 24 horas à 105° C e perderam massa, visto que se quer obter o valor de massa inicial.

Massa seca:

FMF = 7.931 kg (Massa úmida) foi para 7.765,3 kg (Massa Seca);

MCV = 2.266 kg (Massa úmida) foi para 2.135 kg (Massa Seca);

FCC = 1.133 kg (Massa úmida) foi para 1.060,7 kg (Massa Seca).

3º Experimento – Sínter 3

Para o terceiro experimento, utilizou-se novamente a Equação 16 e 17 para encontrar a quantidade total de carga para entrar no reator com a altura de 55 cm (Figura 28).

$$\text{Vol.} = \left(\frac{3,14 \cdot 15^2}{4} \right) \cdot 55 = \mathbf{9.714,375 \text{ cm}^3}$$

$$\text{Massa total: } 1,3 \text{ g/cm}^3 \times 9.714,375 \text{ cm}^3 = \mathbf{12.628,6875}$$

O valor foi aproximado para 12.600 kg, para assim facilitar as medidas dos materiais que serão utilizados no processo, como demonstra a Tabela 4.

Tabela 4 - Valor mássico dos materiais para compor a mistura para produzir o terceiro sínter.

MATERIAL	% em MASSA	MASSA (g)	% MASSA ÚMIDA (g)
FMF	70	8.820	10% = 9.702
MCV	20	2.520	10% = 2.772
FCC	10	1.260	10% = 1.386

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Obs.: para o 3º experimento com o 1º termopar, a altura do leito foi de 55 cm mais 8 cm para fazer o bedding (falsa grelha), totalizando 63 cm, mas foi baseado na altura de 55 cm.

De maneira semelhante aos experimentos anteriores, para o FMF, MCV e FCC foram acrescentadas as seguintes porcentagens de umidade como informa a Tabela 4, pois os materiais passaram pelo processo de secagem em uma estufa com recirculação de ar por 24 horas à 105° C e perderam massa, visto que se quer obter o valor de massa inicial.

Massa seca:

FMF = 9.702 kg (Massa úmida) foi para 9.378,3 kg (Massa Seca);

MCV = 2.745 kg (Massa úmida) foi para 2.591,4 kg (Massa Seca);

FCC = 1.372 kg (Massa úmida) foi para 1.280,5 kg (Massa Seca).

3.2.4 Micropelotização

Antes da sinterização é realizado a micropelotização, nesta etapa ocorre a mistura das matérias-primas juntamente com água (umidade controlada) que é borrifada no material dentro do tambor de micropelotização, para possibilitar o aumento da permeabilidade no leito sinterização, aumentando o fluxo do oxigênio e dos gases gerados no processo, como mostra a Figura 30. Para tais experimentos, segue os dados com a quantidade de material e da umidade (H₂O).

Experimento 1 – Altura de 35 cm e massa de 8.040 kg.

Para micropelotizar, o material foi dividido em duas bandejas:

Bandeja 1 (550g) = 4040 kg + 10% de H₂O (404 ml)

Bandeja 2 (460g) = 4000 kg + 10% de H₂O (400 ml)

Experimento 2 – Altura de 45 cm e massa de 10.300 kg.

Para micropelotizar, o material foi dividido em duas bandejas:

Bandeja 1 (550g) = 5300 kg + 10% de H₂O (530 ml)

Bandeja 2 (460g) = 5000 kg + 10% de H₂O (500 ml)

Experimento 3 – Altura de 55 cm e massa de 12.600 kg

Para micropelotizar, o material foi dividido em duas bandejas:

Bandeja 1 (550g) = 6600 kg + 10% de H₂O (660 ml)

Bandeja 2 (460g) = 6000 kg + 10% de H₂O (600 ml)

Figura 30 - Micropelotização das matérias-primas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Para a micropelotização, foi utilizada uma betoneira, conforme mostra a Figura 31, abaixo.

Figura 31 - Betoneira usada na micropelotização.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A betoneira utilizada tem a rotação fixa de 30,25 rpm para que não houvesse variação dessa variável entre os experimentos e isso não influenciasse no processo de produção das micropelotas e sua inclinação foi ajustada conforme havia a necessidade de manuseio.

3.2.5 Sinterização

Após a micropelotização as misturas foram carregadas no sinterizador, utilizou-se o reator vertical de leito fixo desenvolvido e construído neste mesmo trabalho. E avaliou-se as condições como temperatura, a melhor altura do leito e a movimentação da frente de queima.

Foram utilizados os nove termopares, sendo sete em diferentes alturas no leito, um abaixo da grelha, no intuito de acompanhar as temperaturas na mistura e a temperatura de saída dos gases e um ao redor do leito, no lado externo.

Antes de por a mistura no sinterizador, a grelha foi coberta pelo bedding ou falsa grelha (sínter britado com granulometria bitolada) para proteção da grelha do reator durante o processo de sinterização (Figura 32).

Figura 32- Bedding (falsa grelha).



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Depois, a mistura foi colocada internamente no leito sobre a falsa grelha e coberta com uma pequena camada de carvão, estando pronta para o início da sinterização, como mostra a Figura 33.

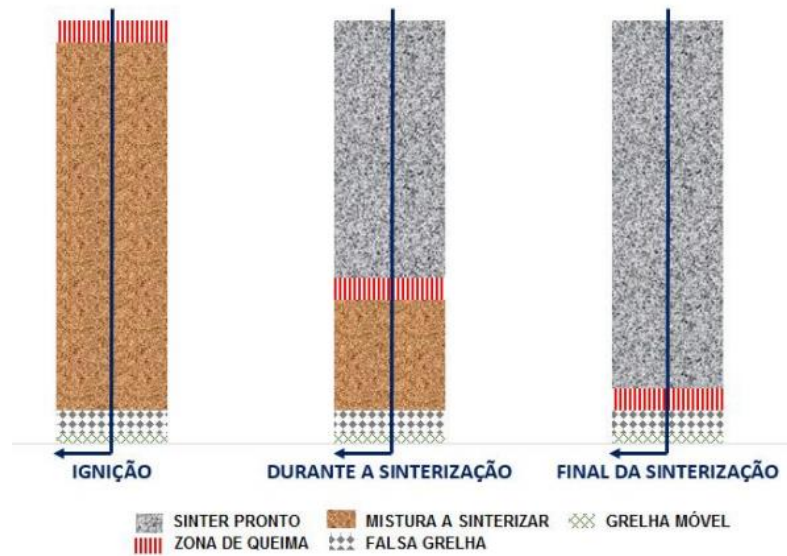
Figura 33 - Abastecimento do leito com o material pelletizado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Através de um maçarico, procedeu-se a ignição do GLP e que em contato com a camada de moinha de carvão vegetal permitiu o início da combustão na sinterização. Após a combustão foi acionado o motor do exaustor iniciando a transferência de calor para as camadas inferiores. Machado (2006) representou este processo conforme a Figura 34.

Figura 34 - Esquema de movimento da frente de combustão.



Fonte: Machado (2006).

A chama do maçarico é extinta quando a temperatura do primeiro termopar se estabiliza e neste momento o exaustor é desligado.

3.2.6 Rendimento

Após a sinterização, foi realizado o tombamento do leito e retirado o síter, cuidadosamente, que seria usado para o ensaio de tamboreamento e caracterizado físico-quimicamente.

O restante do material foi classificado em peneira de 6,35mm, o passante foi considerado como síter de retorno. Desta forma, o rendimento foi calculado com base na porcentagem do material abaixo de 6,35mm.

3.2.7 Caracterização do síter

O síter é um material de formato irregular e heterogêneo, os quais foram caracterizados através dos diversos métodos de análises como o MEV/EDS, FRX e DRX, pois a composição química, mineralógica e a estrutura morfológica do síter refletem diretamente em sua qualidade, com base nessas características. Então, procurou-se ao máximo padronizar as operações envolvidas na produção, tratamento e caracterização deste material.

3.2.7.1 Teste de tamboreamento (tumbler test)

Este teste tem o objetivo de determinar a resistência à abrasão do sínter. Na literatura há normas que padronizam este teste como a norma ABNT NBR ISO 3271: 2018, no entanto, é necessário 20 kg de sínter, ou seja, uma quantidade superior que o equipamento piloto pode produzir. Desta forma, foi usada uma técnica utilizada por Telles (2015) com adaptações, com o objetivo principal de comparar a resistência à abrasão das amostras produzidas.

Para o teste foi utilizado 1 kg de cada sínter gerado nos três experimentos e o mesmo misturador do processo de micropelotização, no caso, a betoneira. A carga foi o sínter retido nas peneiras com aberturas de 7,93mm e 9,52 mm.

Após ser submetido a 210 rotações no micropelotizador, aproximadamente 7 minutos, o material foi classificado na peneira de 6,35mm e os resultados expressos com base na porcentagem de material retido.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Simulação física do Reator Vertical de Leito Fixo

O equipamento conseguiu atingir as expectativas e funcionou corretamente para a produção dos três experimentos, Sínter 1, Sínter 2 e Sínter 3.

No início do processo de sinterização, o leito apresentou baixa permeabilidade a passagem do ar de sucção com a carga completamente úmida. A permeabilidade da carga vai aumentando com a passagem dos gases quentes ocorrendo à inclinação positiva da curva de temperatura. A temperatura máxima é determinada com a chegada da frente de combustão na altura do termopar analisado e assim também se obteve 60,36 minutos através da média dos tempos alcançados nas maiores temperaturas de cada experimento. Por seguinte, nota-se o declive da curva indicando o resfriamento do bolo de sínter para a maior permeabilidade da carga devido a formação de poros pela a queima da moinha de carvão.

O primeiro experimento, Sínter 1, com a altura do leito de 35 cm, e o terceiro experimento, Sínter 3, com a altura de 55 cm (leito cheio), apresentaram muita fragilidade e não houve uma boa sinterização das matérias-primas, o que ocasionou a produção de grande quantidade de partículas finas.

Quanto a melhor altura do leito para a o processo de sinterização, constatou-se que as três alturas conseguiram produzir os sínteres, mas a melhor foi a de 45 cm, utilizada para a sinterização do Sínter 2. O que foi constatado através de análise visual; o Sínter 2 apresentou boa resistência mecânica em relação aos Sínteres 1 e 3 e também foi verificado que houve menor fusão superficial o que pode ter ocasionado maior quantidades de poros nas camadas superiores do leito de sinterização. A quantidade de poros nas camadas inferiores do leito não é determinante no comprometimento da aplicação dos sínteres.

4.2 Análise granulométrica das matérias-primas

De acordo Januzzi (2008) as matérias-primas utilizadas na sinterização, precisam ter a granulometria observada, e se for preciso, usa-se o processo de micropelotização a fim de evitar a perda de permeabilidade no leito de sinterização.

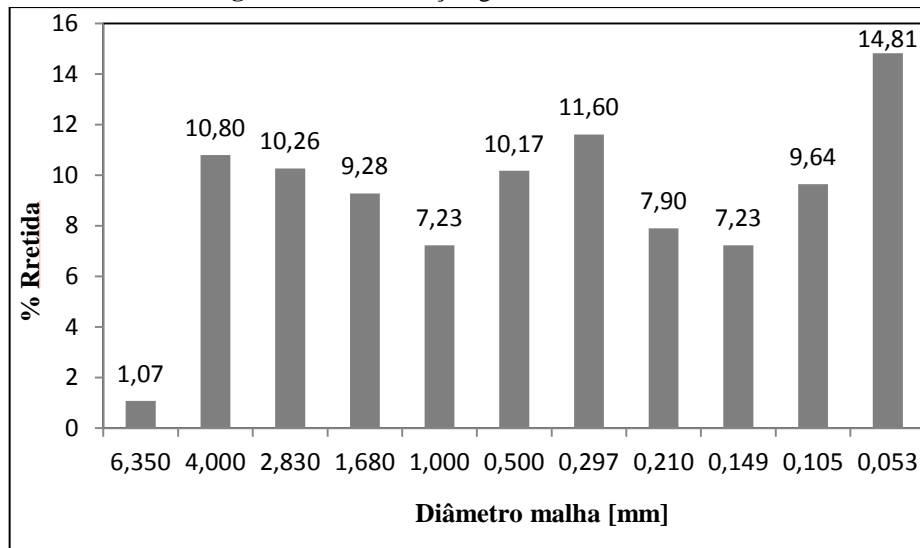
As distribuições granulométricas dos constituintes para o processo apresentaram resultados parecidos no que tange ao diâmetro médio dos mesmos, para cada experimento, pois os valores não se distanciaram de modo significativo, o que demonstra uma boa reprodutibilidade da utilização da metodologia experimental. O controle da granulometria é

um fator fundamental para que o processo ocorra de forma adequada.

Quanto ao minério de ferro, partículas superfinais prejudicam a permeabilidade do leito, causando queda na velocidade de deslocamento da frente de queima. Já as partículas grossas teriam uma ligação interpartícula mais fraca, devido ao fato de a camada aderente formada, ser proporcionalmente menor, em relação às partículas menores, diminuindo, assim, a resistência do sinter formado.

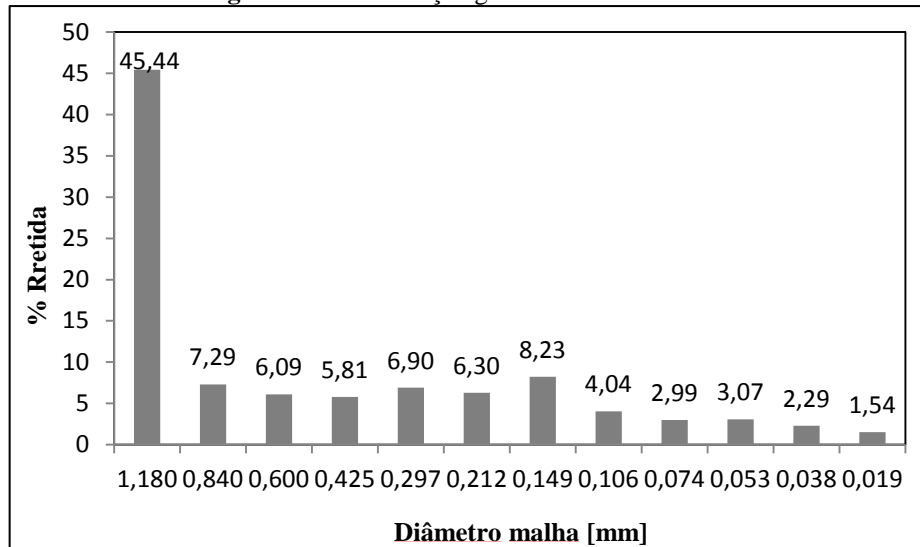
Esse fato mostra a necessidade de adequação dentro de limites estabelecidos, a fração mais grossa dos minérios e sua segregação no leito a sinterizar, respeitando a faixa granulométrica entre 0,053 mm e 6,350 mm, conforme a Figura 35.

Figura 35 - Distribuição granulométrica do FMF.

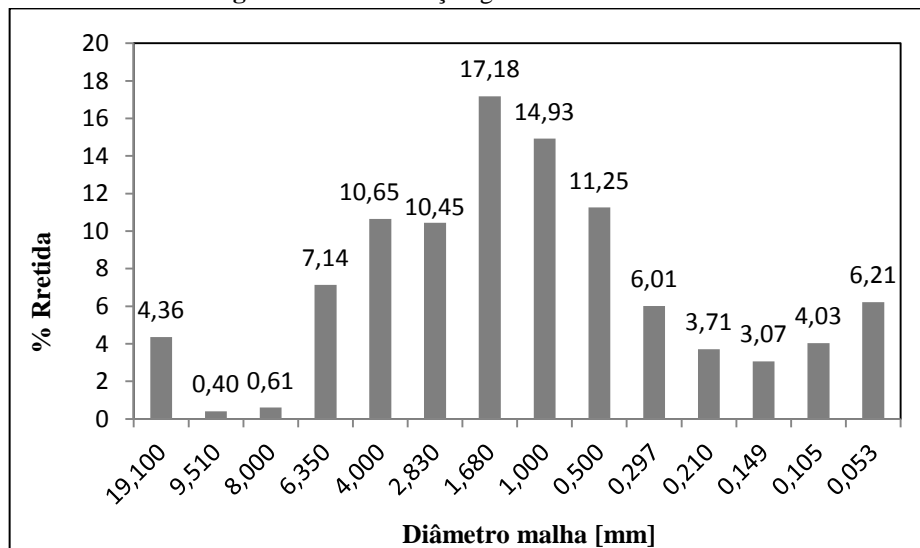


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Também é necessário adequar as distribuições granulométricas dos combustíveis e fundentes, permitindo a elevação da resistência física do sinter dessa região, com ganhos de rendimento de produto e de produtividade na sinterização. As frações superfinais da MCV e do FCC foram reduzidas. Nas Figuras 36 e 37, segue a distribuição granulométrica dos materiais citados, respectivamente.

Figura 36 - Distribuição granulométrica do MCV.

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 37 - Distribuição granulométrica do FCC.

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.3 Teor de Umidade ótima

Para o teste de teor de umidade ótima foi utilizado uma betoneira adequada, controlando-se gradualmente a adição de umidade o que proporcionou que a aglomeração ocorresse de forma correta e satisfatória. Como a rotação foi mesma durante toda a análise não houve influência dessa variável na obtenção do teor de umidade ótima.

A Tabela 5 exemplifica todo o processo que ocorreu durante os 3 dias e as partes em destaque são os menores valores de massa encontrados.

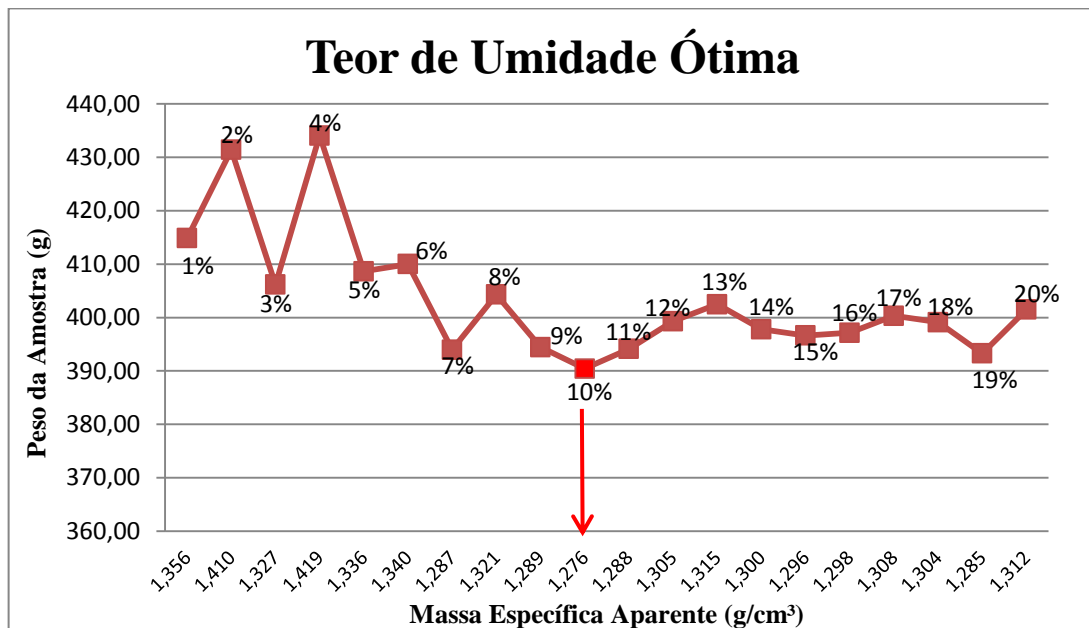
Tabela 5 - Demonstração de dados gerados para o teor de umidade ótima.

Determinação do teor de umidade ótima												
Amostra	Exp. 1 (g)	M. Esp. Ap. (g/cm ³)	% H ₂ O	Tempo (min)	Exp. 2 (g)	M. Esp. Ap. (g/cm ³)	% H ₂ O	Tempo (min)	Exp. 3 (g)	M. Esp. Ap. (g/cm ³)	% H ₂ O	Tempo (min)
1	386,5	1,267	1	5	428,5	1,405	1	5	425,5	1,395	1	5
2	388	1,272	2	5	422,5	1,385	2	5	479,5	1,572	2	5
3	387	1,269	3	5	425	1,393	3	5	402,5	1,320	3	5
4	404,5	1,326	4	5	436	1,430	4	5	457,5	1,500	4	5
5	409,5	1,343	5	5	418	1,370	5	5	394,5	1,293	5	5
6	403	1,321	6	5	417,5	1,369	6	5	405,5	1,330	6	5
7	371	1,216	7	5	403,5	1,323	7	5	403,5	1,323	7	5
8	394	1,292	8	5	413	1,354	8	5	402	1,318	8	5
9	386,5	1,267	9	5	391,5	1,284	9	5	401,5	1,316	9	5
10	388,5	1,274	10	5	386	1,266	10	5	393	1,289	10	5
11	395,5	1,297	11	5	394	1,292	11	5	389	1,275	11	5
12	399,5	1,310	12	5	405	1,328	12	5	389,5	1,277	12	5
13	406,5	1,333	13	5	407	1,334	13	5	390	1,279	13	5
14	400,5	1,313	14	5	396	1,298	14	5	393	1,289	14	5
15	396	1,298	15	5	393,5	1,290	15	5	396,5	1,300	15	5
16	397	1,302	16	5	401	1,315	16	5	389,5	1,277	16	5
17	406	1,331	17	5	393	1,289	17	5	398	1,305	17	5
18	404,5	1,326	18	5	389,5	1,277	18	5	399,5	1,310	18	5
19	393,5	1,290	19	5	380,5	1,248	19	5	402	1,318	19	5
20	401,5	1,316	20	5	398	1,305	20	5	401	1,315	20	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Os valores obtidos com a média das análises de massa das amostras e da massa específica aparente, para a determinação do teor de umidade ótima podem ser vistos na Figura 38.

Figura 38 - Gráfico da determinação do teor de umidade ótima.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Segundo Telles (2015), para o seu trabalho o teor de umidade ótima foi de 8% para a sua mistura, e para o trabalho de Starling (2012), a umidade ótima das misturas variou de 8 a 9,5%, e para a pesquisa de Lopes (2012), o teor de umidade ótima ficou em 14%.

Portanto, através das matérias-primas utilizadas nos experimentos, o teor de umidade ótima variou entre 9%, 10% e 11%, e por média, optou-se por utilizar o teor de umidade ótima em 10%, visto que o valor se encontra dentro dos parâmetros baseado nas literaturas.

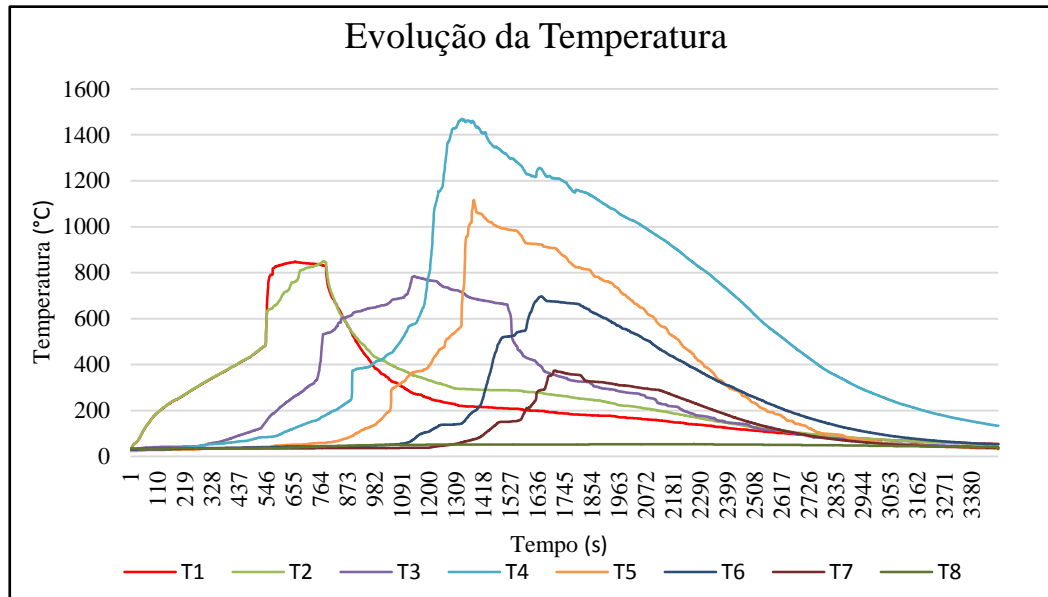
Sendo assim, atingir a umidade ótima favorece a otimização dos grânulos e consequentemente a boa permeabilidade do leito no decorrer das queimas sendo estes parâmetros fundamentais para o bom desempenho da sinterização.

4.4 Temperatura

As misturas com maiores permeabilidades permitem maior vazão de ar no interior do leito de sinterização, aumentando os picos de temperatura e diminuindo o tempo de processo (TELLES, 2015).

A Figura 39 é a evolução da temperatura ao longo do leito de sinterização para o 1º Experimento, Sínter 1 com a altura de 35 cm, com a velocidade do ar de 0,82 m/s e exibe o registro de temperatura de cada termopar localizado na região vertical do reator.

Figura 39 - Evolução da temperatura do 1º Experimento – Sínter 1 com a altura de 35 cm.

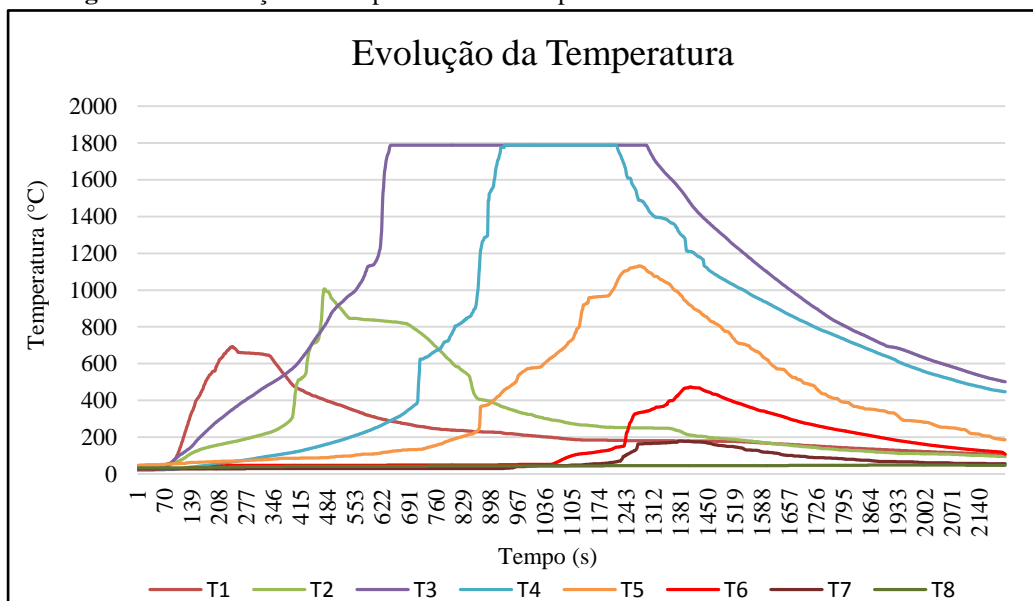


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Percebe-se que as curvas da evolução de temperatura têm aspectos parecidos com a temperatura que atingiu um valor máximo seguido de uma redução gradual, caracterizando o avanço da frente de combustão. Neste ensaio experimental o máximo valor de temperatura registrado foi de 1468,7 °C em aproximadamente 1 hora e 51 minutos.

Para o 2º Experimento, Sínter 2 com a altura de 45 cm, a evolução da temperatura é representada na Figura 40, e possui a velocidade do ar de 0,86 m/s. Neste experimento o valor máximo de temperatura foi de 1787,9°C em aproximadamente 1 hora e 6 minutos.

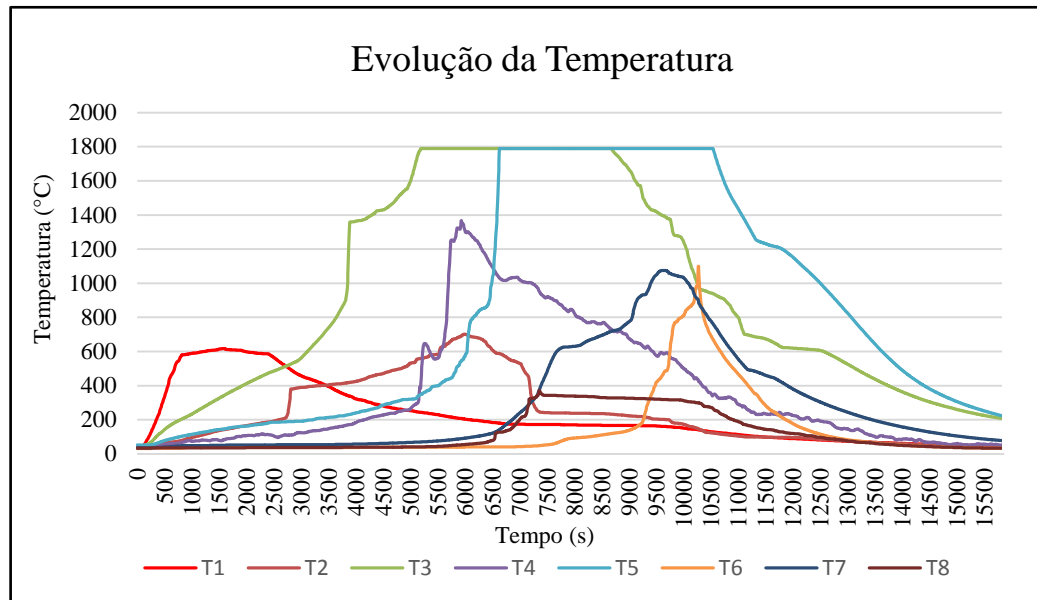
Figura 40 - Evolução da temperatura do 2º Experimento – Sínter 2 com a altura de 45 cm.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Na Figura 41, apresenta a evolução da temperatura para o 3º Experimento, Sínter 3 com a altura de 55 cm e com velocidade do ar de 0,93 m/s.

Figura 41 - Evolução da temperatura do 3º Experimento – Sínter 3 com a altura de 55 cm.



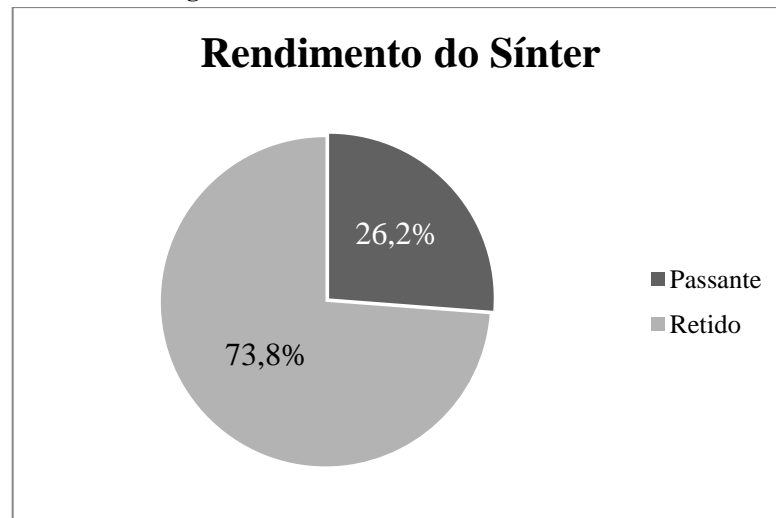
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Para o 3º Experimento, o máximo valor de temperatura registrado foi de 1789,45 °C em aproximadamente 1 hora e 38 minutos.

4.5 Rendimento da sinterização

O rendimento do processo de sinterização pode ser compreendido como o indicador de aproveitamento da matéria-prima, mostrando a quantidade de resíduo sólido necessária para a conversão em sínter no processo.

Com a produção de três sínteres, foi necessário tirar a média dos valores das massas na relação entre o passante e o retido em peneira de malha de abertura de 6,35mm, em percentual, para que assim obtivesse o rendimento deste processo experimental, Figura 42.

Figura 42 - Gráfico de rendimento do sínter.

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

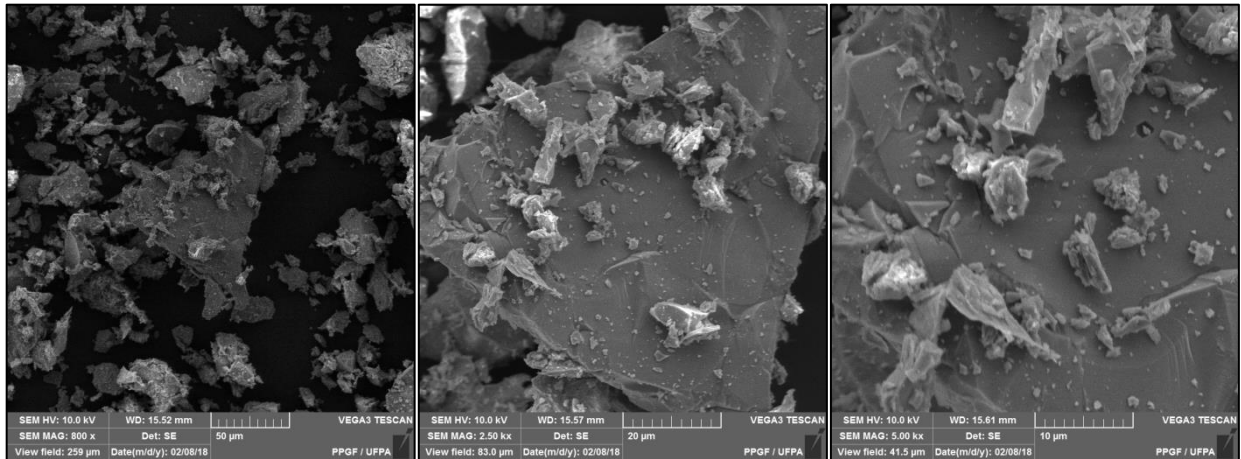
Conforme a literatura consultada de Coelho (2002), o rendimento de seu trabalho foi de 70,82% a 74,95%, e serviu para usar como parâmetro para este experimento e concluir que o rendimento foi satisfatório e atendeu as expectativas, apresentando um bom bolo de sínter (retido) e poucos finos (passante), que seriam os sínteres de retorno. Visto que, se o índice de rendimento na sinterização for superior a 80% pode ser algo, se não utópico, relativamente difícil de alcançar.

4.6 Caracterização do sínter

4.6.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

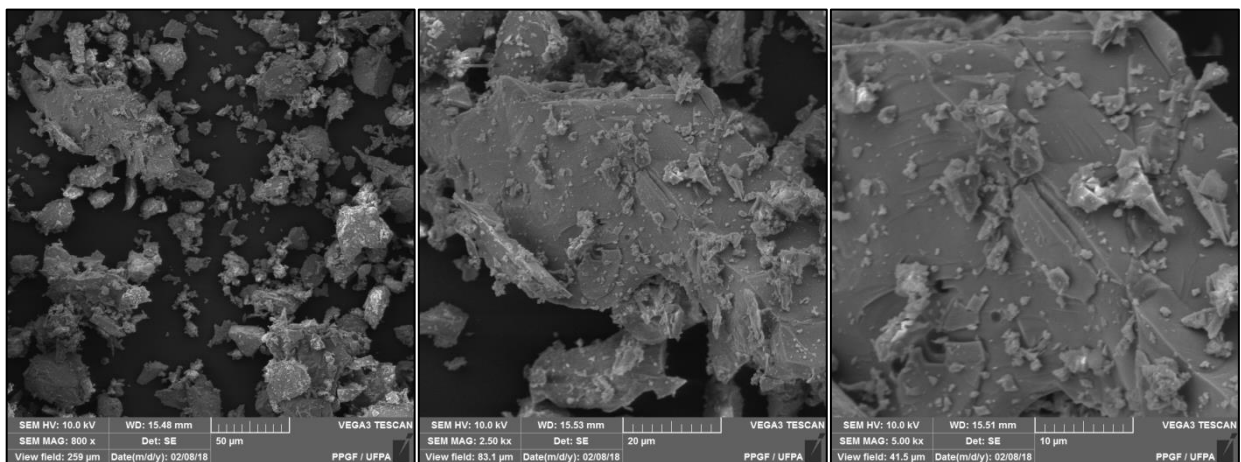
As características microestruturais de um sínter influem nas suas propriedades e nas propriedades do ferro gusa e conseqüentemente do aço produzido, por isso, é essencial a análise da sua microestrutura. Para analisar a morfologia dos produtos utilizou-se o MEV.

No Sínter 2 (Figura 43) que foi usado como referência em comparação as outras amostras de sínteres produzidos, apresentaram algumas formas irregulares. Na imagem há várias partículas mistas, e percebe-se que essas partículas, de tamanhos e formas diversificadas, são formadas pela aglomeração de outros particulados menores. Isto indica que as partículas maiores agem como nucleantes, fazendo com que as partículas menores se aglomerem ao redor das mesmas. Observa-se nesta estrutura grande incidência de poros, quando comparados aos demais experimentos.

Figura 43 - Análise MEV do Sínter 2.

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

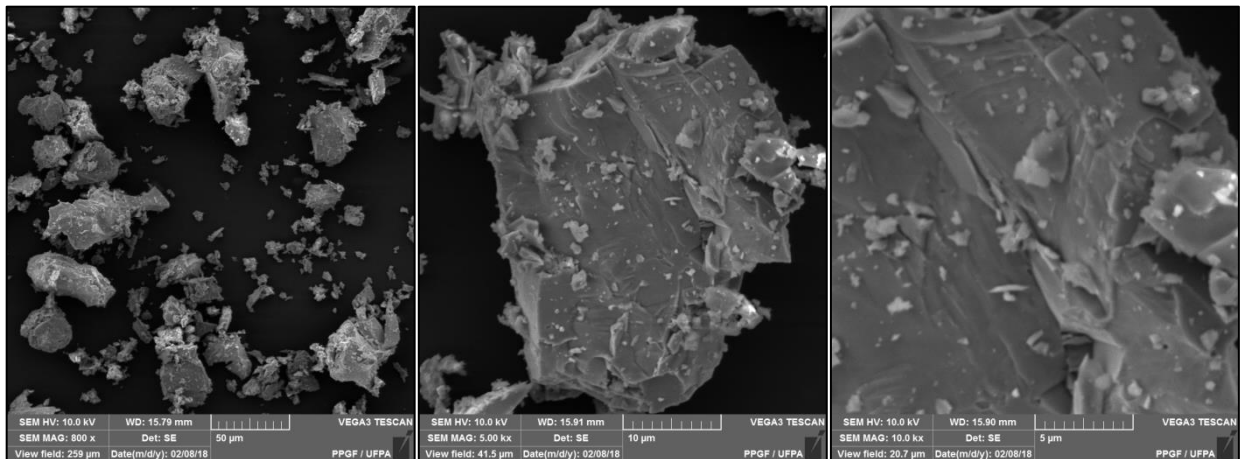
Na Figura 44, a morfologia encontrada na microestrutura do Sínter 1 aponta algumas formas irregulares, regiões de nucleação, partículas mistas e aglomeração, visto que a incidência de aglomerados foi menor em comparação ao Sínter 2. Além de ter aspecto poroso.

Figura 44 - Análise MEV do Sínter 1.

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A micrografia observada na Figura 45 exibe uma estrutura semelhante aos sinteres dos demais experimentos, constatando a pouca presença de poros, alguns formatos irregulares, regiões de nucleação, partículas mistas e pouca aglomeração, visto que a incidência de grandes aglomerados foi menor em comparação ao Sínter 2 ao Sínter 1.

Figura 45 - Análise MEV do Sínter 3.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

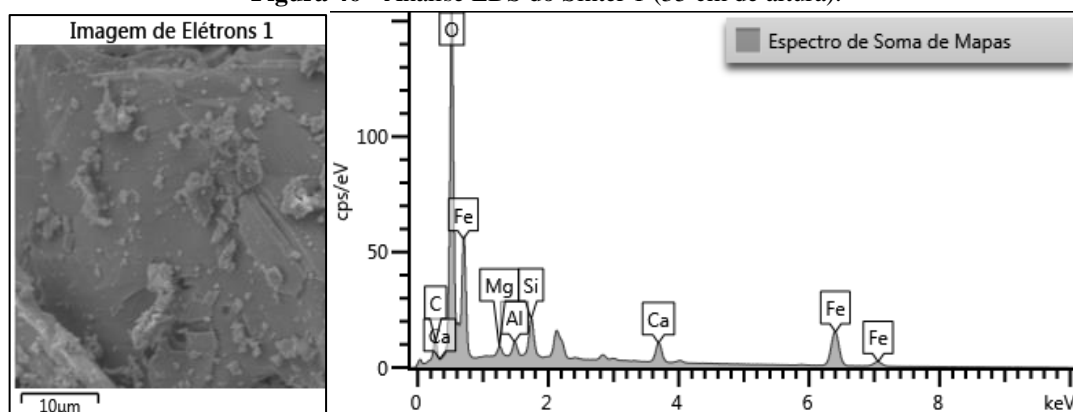
Todas as amostras foram retiradas das camadas intermediárias do bolo de sinterização de cada altura.

A porosidade é um parâmetro fundamental no processo de sinterização de minério de ferro, por conta da sua influência direta na redutibilidade e resistência dos produtos, segundo Bhagat (2006), a formação de micro poros é o principal influenciador no aumento do índice de redutibilidade (RI) do sinter.

4.6.2 Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

Análise quantitativa através do EDS foi realizada nos três sínteres, para que houvesse uma comparação das análises quantitativas discriminando os elementos encontrados nas amostras. Para o Sínter 1 (Figura 46), o percentual de cálcio foi de 4,75%, oxigênio de 31,43%, carbono de 4,62%, magnésio foi de 0,76%, alumínio de 1,08%, silício de 2,98% e o ferro que foi de 54,38% na região analisada, sendo um resultado que corrobora os dados obtidos tanto no FRX quanto no DRX.

Figura 46 - Análise EDS do Sínter 1 (35 cm de altura).

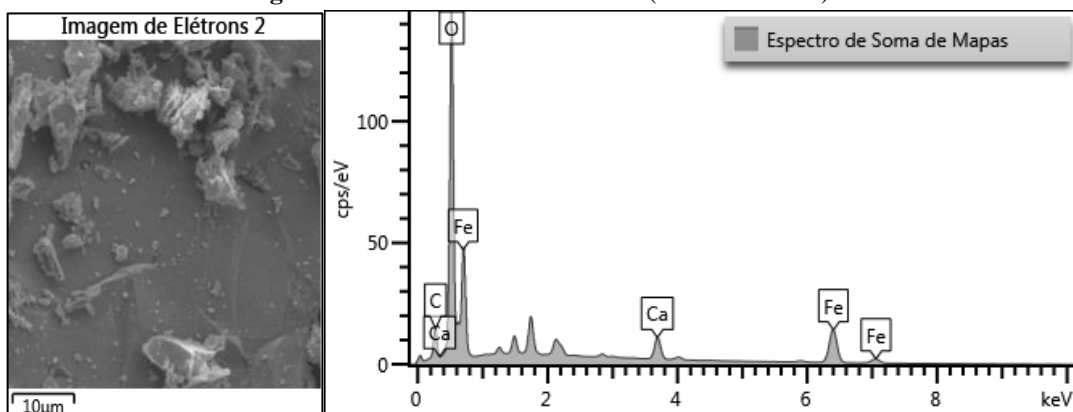


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Na Figura 47, Sínter 2, o percentual de cálcio foi de 5,71%, oxigênio de 34,01%, carbono de 6,84% e o de ferro foi de 57,66% na região analisada, sendo também um resultado compatível com os resultados de FRX e DRX, apesar da ausência de alguns elementos em comparação ao Sínter 1, no entanto vale ressaltar que os resultados do EDS são a partir de pontos considerados no sínter.

De acordo com Telles (2015), devido à heterogeneidade do sínter a proporção dos elementos pode variar dependendo da região que está sendo analisada. Sendo também um resultado compatível com os dados apresentados por Oliveira (2009), que foi de 58% de ferro, utilizando sínter feed de origem idêntica aos utilizados neste trabalho.

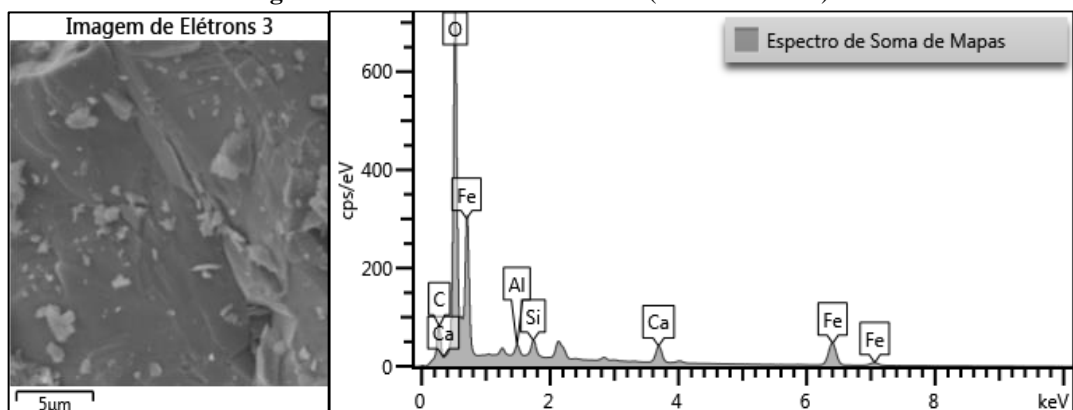
Figura 47 - Análise EDS do Sínter 2 (45 cm de altura).



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A amostra do Sínter 3 (Figura 48) mostra o percentual de cálcio foi de 3,73%, oxigênio de 29,38%, carbono de 7,23%, alumínio de 0,8%, silício de 1,2% e o de ferro com 53,44% na região analisada, dentro das expectativas em relação às matérias primas utilizadas.

Figura 48 - Análise EDS do Sínter 3 (55 cm de altura).



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.6.3 Fluorescência de Raios-X (FRX)

A determinação da composição química das amostras requeridas foi realizada por FRX e pela perda ao fogo.

A Tabela 6 indica as matérias-primas analisadas, e observou-se que no FCC a umidade, matéria orgânica e dióxido de carbono são removidos por ação da alta temperatura, deixando resíduo de CaO e MgO, junto com silicatos (SiO_2) e outros óxidos, e os percentuais na composição são característicos do calcário calcítico, e sua perda ao fogo foi de 39,9%. O FMF apresentou maior concentração de óxido em Fe_2O_3 com 78,5%, mas através do DRX identificou-se a presença de hematita e magnetita e perda ao fogo de 5%. A MCV teve a maior de perda ao fogo, 81,9%, devido a uma provável taxa elevada de matéria orgânica e outros compostos voláteis que foram removidos por conta da alta temperatura, e os óxidos observados são o SiO_2 , Al_2O_3 , CaO e Fe_2O_3 .

Tabela 6 - FRX e perda ao fogo do FCC, FMC e MCV.

FCC		FMF		MCV	
Componente	% m/m Corr.	Componente	% m/m Corr.	Componente	% m/m Corr.
MgO	2,046	Al_2O_3	4,095	SiO_2	10,9
Al_2O_3	3,331	SiO_2	4,912	Al_2O_3	2,6
SiO_2	5,341	P_2O_5	0,270	Fe_2O_3	1,06
P_2O_5	0,090	SO_3	0,094	TiO_2	0,11
SO_3	0,071	K_2O	0,380	MgO	0,41
K_2O	0,447	CaO	1,891	CaO	1,73
CaO	45,695	TiO_2	0,267	Na_2O	0,18
TiO_2	0,205	MnO	0,713	K_2O	0,49
Fe_2O_3	2,327	Fe_2O_3	78,499	P_2O_5	0,11
SrO	0,106	Pr_6O_{11}	0,144	SO_3	0,41
PF	39,938	Nd_2O_3	0,328	Cl	0,1
		PF	5,050	PF	81,9
Total	99,597	Total	96,643	Total	100,000

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Na Tabela 7, há a análise de FRX e perda ao fogo dos sínteres 1, 2 e 3. Os sínteres apresentaram 0% de perda ao fogo, devido o produto ser proveniente da sinterização e ocorrer em altas temperaturas. A presença dos óxidos majoritários em comum nos Sínteres 1, 2 e 3 são os CaO, silicatos, Al_2O_3 e o Fe_2O_3 , em grande percentual devido ser utilizado em maior quantidade na produção do sínter.

Tabela 7 - FRX e perda ao fogo do Sínter 1, Sínter 2 e Sínter 3.

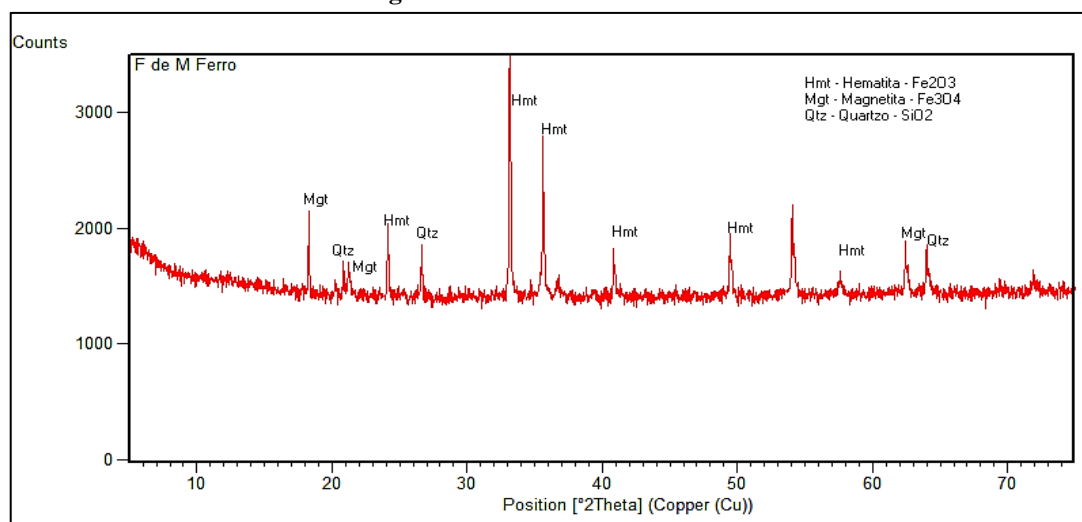
Sínter 1		Sínter 2		Sínter 3	
Componente	% m/m Corr.	Componente	% m/m Corr.	Componente	% m/m Corr.
MgO	0,478	MgO	0,561	Al ₂ O ₃	2,03
Al ₂ O ₃	1,98	Al ₂ O ₃	2,11	SiO ₂	10,8
SiO ₂	9,75	SiO ₂	10,6	P ₂ O ₅	0,167
P ₂ O ₅	0,187	P ₂ O ₅	0,213	SO ₃	0,178
SO ₃	0,198	SO ₃	0,215	K ₂ O	0,496
K ₂ O	0,492	K ₂ O	0,495	CaO	11
CaO	13,4	CaO	10,2	TiO ₂	0,172
TiO ₂	0,178	TiO ₂	0,179	Cr ₂ O ₃	0,13
MnO	0,714	MnO	0,695	MnO	0,669
Fe ₂ O ₃	72	Fe ₂ O ₃	74	Fe ₂ O ₃	73,7
Nd ₂ O ₃	0,328	PrSO ₁₁	0,134	Nd ₂ O ₃	0,365
PF	0	Nd ₂ O ₄	0,345	PF	0
		PF	0		
Total	99,705	Total	99,747	Total	99,707

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.6.4 Difração de Raios-X (DRX)

Através da análise no DRX, os resultados foram analisados pelo programa *X'Pert HighScore*, e obtivemos os seguintes gráficos com as fases cristalinas nas matérias primas e dos sínteres.

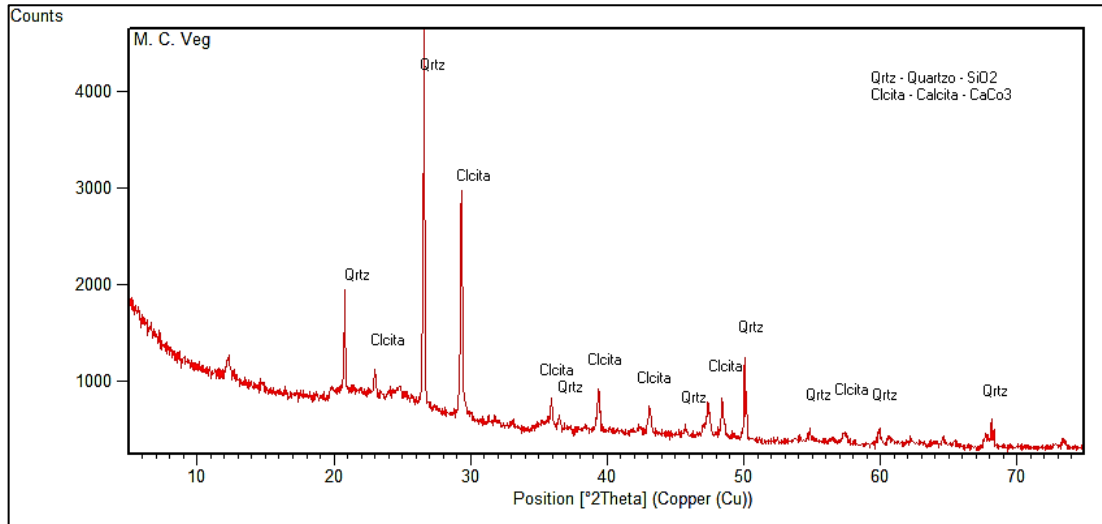
No FMF (Figura 49), nota-se a presença de três fases mineralógicas predominantes: hematita (Fe₂O₃), magnetita (Fe₃O₄) e quartzo (SiO₂), isto comprova a presença do minério de ferro hematítico.

Figura 49 - Análise DRX do FMF.

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Na MCV (Figura 50), os picos que se destacam são de quartzo (SiO_2) e calcita (CaCO_3), acredita-se que a presença de quartzo se deva a contaminação nos pátios de estocagem.

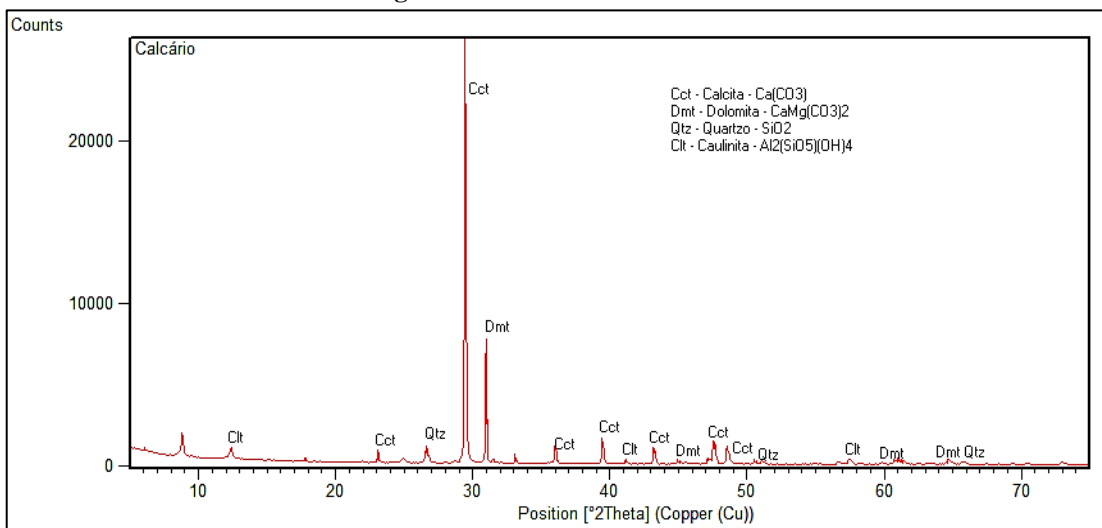
Figura 50 - Análise DRX do MCV.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

No FCC (Figura 51), os picos majoritários são de calcita (CaCO_3) em maiores concentrações, dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), quartzo (SiO_2) e caulinita ($\text{Al}_2(\text{SiO}_5)(\text{OH})_4$). O alto teor de CaO obtidos na FRX e os picos de calcita no difratograma de DRX comprovam que o material é calcário calcítico.

Figura 51 - Análise DRX do FCC.



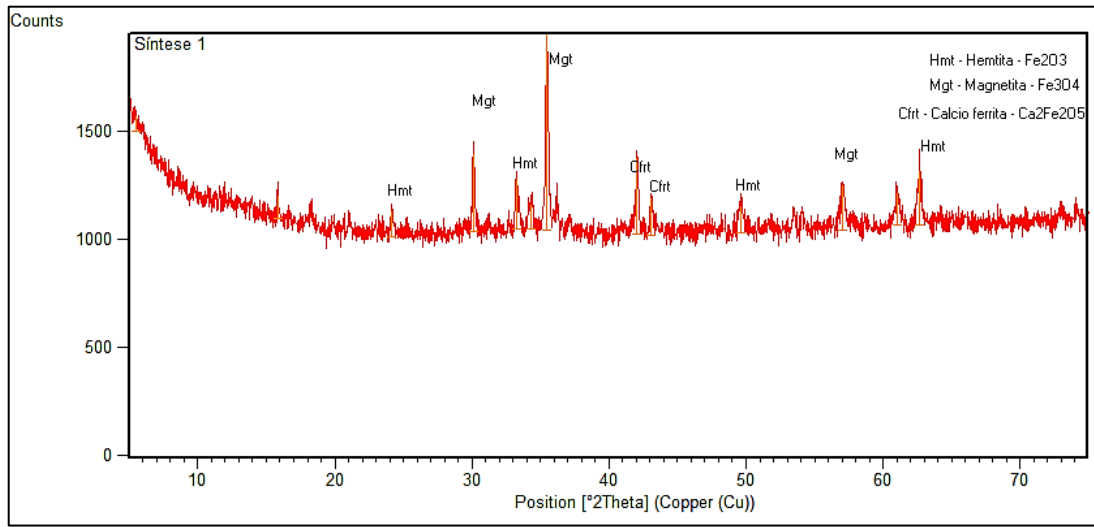
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

O teor de quartzo (SiO_2) bem abaixo daquele visto em minérios de ferro consumidos no processo de sinterização é benéfico para a qualidade do sinter, pois haverá um maior

controle na formação de suas fases ligantes. Essa afirmação é feita considerando-se ainda o controle de fatores operacionais importantes, como a quantidade de combustível, a temperatura e tempo de sinterização, etc. (MAGALHÃES et al., 2007).

Para o sínter 1 (Figura 52) constatam-se as fases cristalinas majoritárias de hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) e cálcio-ferrita ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$).

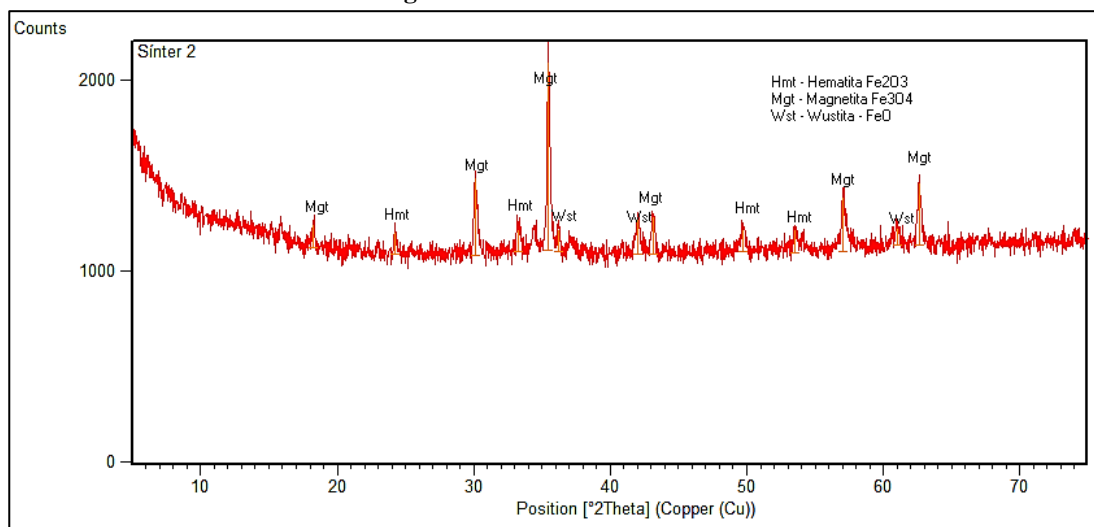
Figura 52 - Análise DRX do Sínter 1.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

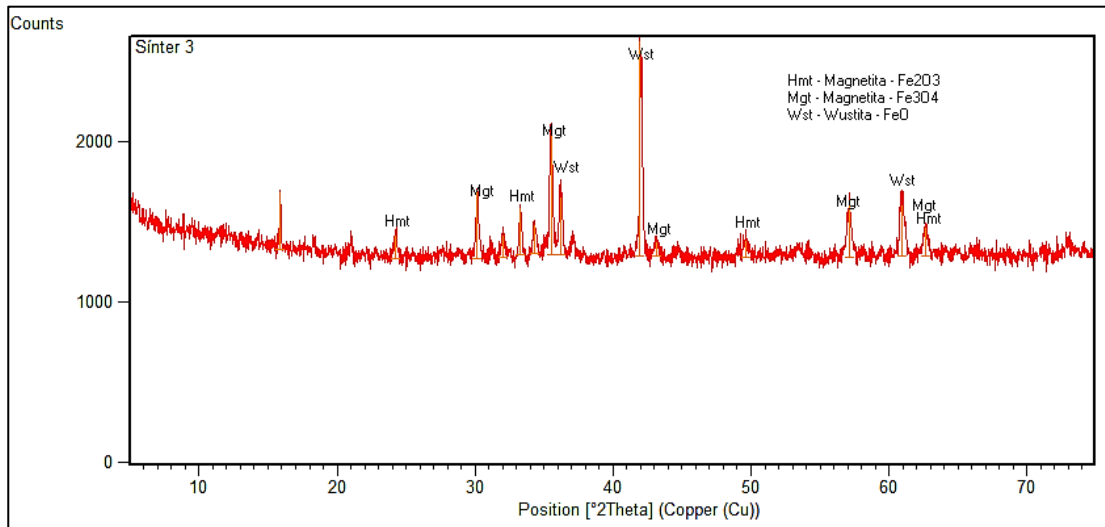
O sínter 2 (Figura 53) apresenta as fases cristalinas majoritárias de magnetita (Fe_3O_4), hematita (Fe_2O_3) e wustita (FeO).

Figura 53 - Análise DRX do Sínter 2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A amostra analisada do sínter 3 (Figura 54) exhibe as fases cristalinas majoritárias de magnetita (Fe_3O_4), wustita (FeO) e hematita (Fe_2O_3).

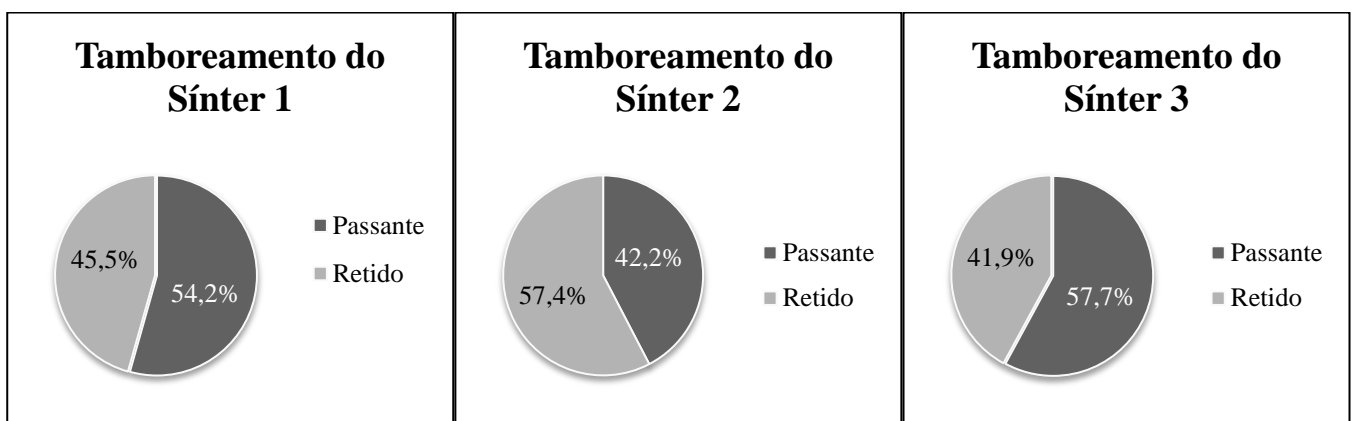
Figura 54 - Análise DRX do Sínter 3.

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Conclui-se que as fases mineralógicas formadas no 1º, 2º e 3º experimento foram semelhantes, apresentando proporções aproximadas dos elementos.

4.6.5 Tamboreamento do sínter (tumbler test)

A Figura 55 exibe o resultado obtido no teste de tamboreamento dos três sínteres, ou seja, a relação entre o material passante e o retido em peneira de malha de abertura de 6,35mm, em percentual.

Figura 55 - Gráfico de tamboreamento do sínter 1, 2 e 3.

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

O sínter necessita ter boa resistência mecânica devido aos esforços de carregamento ao qual estará submetido no interior do alto forno. Um sínter com baixa resistência mecânica pode gerar grande quantidade de finos, que causará uma diminuição da permeabilidade dos gases de alto forno, levando a uma queda no rendimento do processo.

A resistência ao tamboreamento dos entre os sínteres produzidos foi de 45,5% para o sínter 1, 57,4% para o sínter 2 e 41,9% para o sínter 3, onde destaca-se que a melhor resistência para o teste foi o Sínter 2, pois garantiu pouca geração de finos em relação aos outros. O que vem a confirmar que o sínter com a altura mais adequada para o processo foi a de 45 cm.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O reator vertical de leito fixo mostrou-se eficaz no processo de sinterização para obter o sínter de fino de minério de ferro, boa granulometria e elevadas temperatura acima de 1.000 °C em todos os experimentos, garantindo a eficiência do processo.

Por meio dos experimentos realizados foi possível a avaliação da resistência a abrasão do sínteres produzidos e comprovar a sua qualidade e utilidade com o intuito de reaproveitamento na produção do ferro gusa, evitando-se descartar esses produtos no meio ambiente.

Os resultados obtidos revelaram que o Sínter 2 com a altura de 45 cm (leito parcialmente cheio), apresentou grau de sinterização maior, ótima resistência a abrasão, boa granulometria, ótimo rendimento, boa porosidade, alcançou as temperaturas adequadas no processo, características químicas dentro do esperado e aparência física com boa aglomeração.

O Sínter 1 com a altura de 35 cm (leito pela metade) apresentou algumas qualidades semelhantes ao Sínter 2, mas não obtive a melhor qualidade, além de não ter ocorrido uma boa aglomeração das matérias-primas o que gerou um bolo frágil e com muitos finos, situação semelhante em que o Sínter 3 com 55cm (leito cheio) se encontra, pois também não se aglomerou adequadamente e produziu finos em maior quantidade que o Sínter 2.

O bom desempenho do processo de micropelotização deve-se pelas partículas nucleantes da mistura com a redução de partículas superfina e supergrossas, que conduziu a uma elevação da permeabilidade do leito com consequente aumento de produtividade.

A escolha da MCV como combustível impacta diretamente na resistência do sínter, devido sua alta reatividade. O teor de ferro contido nos sínteres produzidos atendeu as expectativas.

A grande quantidade de poros indica um alto índice de redutibilidade do sínter 2 produzido.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Através deste equipamento poderão surgir novos trabalhos e pesquisas relacionadas à sinterização.

Abaixo segue as principais sugestões para trabalhos futuros:

- Realização de estudo para a aplicação do síter constituído de grandes parcelas de resíduos;
- Reaproveitamento de resíduo siderúrgico pelo processo de sinterização;
- Avaliação do índice de porosidade do síter produzido e avalia-lo pelo ponto de vista comparativo com as características mecânicas encontradas neste trabalho;
- Caracterização quantitativa de síter a partir de resíduos sólidos siderúrgicos por microscopia ótica.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992, “**NBR 12053: Solo-brita - Determinação de dosagem - Método de ensaio**”, Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994, “**NBR 8652: Grandezas e unidades de medida na sinterização de minério de ferro – Padronização**”, Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, “**NBR ISO 4701: Minérios de ferro e pré-reduzidos - Determinação da distribuição granulométrica por peneiramento**”, Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, “**NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**”, Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, “**NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**”, Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011, “**NBR ISO 3082: Minérios de ferro - Procedimentos de amostragem e preparação de amostras**”, Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, “**NBR 16214: Minérios de ferro - Método simplificado para a determinação do teor de umidade para controle de processo**”, Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018, “**NBR 7181:2018 Solo - Análise granulométrica**”, Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018, “**NBR ISO 3271: Minérios de ferro como insumo para alto-forno e redução direta — determinação dos índices de tamboreamento e abrasão**”, Rio de Janeiro.
- ALVES, D. S., **Construção e Simulação Física do Sinterizador Piloto Tipo Greenawalt**. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, p. 66, 2017.
- ARAUJO, L. A. **Manual de Siderurgia**. São Paulo: Arte e Ciência, 1997. v. 1.
- BALL, D. F.; DARTNELL, J.; DAVISON, J.; GRIEVE, A.; WILD, R. **Agglomeration of Iron Ore**, London, 1973. (Heinemann Educational Books Limited).
- BHAGAT, R.P. **Porosity of sinter its relation with the sintering indices**. Isij International, Índia, v. 46, n. 11, p.1728-1730, 2006.
- CAMPOS, A. R.; FONSECA, V. O. **Centro de Tecnologia Mineral - Parte II: pelotização**. Rio de Janeiro, Cap. 16, p. 683-750. 2010.

COELHO, L. H. **Rendimento na Sinterização em Função da Mineralogia do Sínter Feed**: Rede Temática em Engenharia e Materiais. Ouro Preto: UFOP; CETEC; UEMG, 2002.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Mineração e economia verde**. Brasília: CNI, 2012.

CUMMING, M.J.; THURLBY J.A. **Developments in Modelling and Simulation of Iron Sintering**, Ironmaking and Steelmaking, v. 17, n. 4, (April, 1990), p. 245- 254, ISSN 0301-9233.

DAWSON, P. R. **Part 2 - Research studies on sintering and sinter quality**. Ironmaking and Steelmaking, v. 20, n.2, p. 137-143, 1993.

DEDAVID, B.A.; GOMES, C.I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

DIAS, F. O. ; CAUX, A. C. P. S.; SANTOS, R.; SOBRINHO, P. J. N. **Reciclagem de lama de aciaria através de aglomeração para utilização em altos-fornos**. Vila Velha: ABM, 2011.

DIXON, A. **An improved equation for the overall heat transfer coefficient in packed beds**, Chemical Engineering and Processing, Department of Chemical Engineering, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA 01609, USA, v.35, p.323-331. 1996.

FONSECA, V.O. **Envelhecimento de pelotas de minério de ferro com diferentes basicidades e teores de MgO. 2003**. 253 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), REDEMAT – Ouro Preto, 2003.

FONTES, A. V. **Caracterização Tecnológica de Minério de Ferro Especularítico**. – Rio de Janeiro: Escola Politécnica, 2013.

FONTES, P.J.P.; QUIRINO, W.F.; PASTORE, J.R.F.; FILGUEIRAS, S.M.S. **Aglutinante para briquetagem de carvão vegetal**. Brasília: Laboratório de Produtos Florestais, Departamento de Pesquisas, Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, 1984.

GEERDES, M. et al.; Livro: **Práticas Modernas para Operação de Alto-Fornos**. Coordenação da edição Brasileira. p. 17- 28, 2007.

GEERDES, M., TOXOPEUS, H., VLIET, C. V. D. **Modern blast furnace ironmaking - an introduction**. New York: Ijmuiden, 2004.

HINKLEY, J. et al.; **An Investigation of Pre-ignition Air Flow in Ferrous Sintering**. International Journal of Mineral Processing. Australia, v 42, p. 37-52, 1994.

HONORATO, E. P. **Adequação granulométrica das matérias primas e do sistema de segregação contínua (I.S.F), para melhorias na produtividade e qualidade do sínter para os Altos-Fornos**. 154 f. 2005. Dissertação (Mestrado) – UFMG/ Belo Horizonte, 2005.

ISHIKAWA, Y. **Recent progress in the sintering technology – high reducibility and improvement of fuel consumption**. Ironmaking Conference Proceedings, AIME, Pittsburgh, EUA, v. 41, p. 80-89, 1982.

JANUZZI, A. **Análise da aglomeração a frio no processo HPS (Hybrid Pelletized Sínter) com ênfase nas matérias-primas envolvidas**. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - UFMG/ Belo Horizonte, 2008.

KESTENBACH, H.J.; BOTA FILHO, W.J. **Microscopia eletrônica transmissão e varredura**. São Paulo: ABM, 1994.

KÖPERN – Briquetting with roller presses (Prospecto). Specialists in Hot and Cold Briquetting. Germany. p. 24, 2017.

LAURENTINO, C. L. **Transferência de calor em leitos fixos com aplicação em reatores de fermentação em estado sólido**. 103 f. (Dissertação), UNESP, 2007.

LEMOS, L. R.. **Produção de briquetes de resíduos siderúrgicos para utilização em altos-fornos**. Belo Horizonte: UFMG: 2015.

LOPES, M. V. **Caracterização do sínter para uso em altos-fornos a carvão vegetal**. 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais, Itajubá, 2012, p. 14-25.

LOVEL, R. **The influence of fuel reactivity on iron ore sinter**. Isij International. Japan, v. 49, n. 2, p. 195-202, 2009.

LU, L; HOLMES, R.J; MANUEL, J.R. **Effects of alumina on sintering performance of hematite iron ores**. Isij International, Japan, v. 47, n 3, p. 349-358, 2007.

MACHADO, M. L. P. **Apostila de siderurgia - da matéria prima ao aço laminado**. Vitória: CEFETES, 2006.

MAGALHÃES, M. S., BRANDÃO, P. R. G.,TAVARES, R. P. **“Types of goethite from Quadrilátero Ferrífero's iron ores and their implications in the sintering process”**. Mineral Processing and Extractive Metallurgy: UFMG, 2007.

MARTINS, M.F.; SALVADOR, S.; THOVERT, J.F., DEBENEST, G. **Co-current combustion of oil shale – Parte 2: structure of the combustion front**. France: Université de Toulouse, 2010.

MONHOL, F. A. F.; MARTINS, M. F. **“Cocurrent Combustion of Human Feces and Polyethylene Waste”**. Waste and Biomass Valorization, Suça, v. 6, n. 3, p. 425–432, 2015.

MOURÃO, J. M. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: 2008-2025**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008. 50 p. [Nota técnica].

MOURÃO, M.B. **Introdução à siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2007, 428 p.

MUKHERJEE, T. **Structure of fluxed sinter**. Iron and steel making, London, England, v. 12, no. 4, p. 15,11,55, 1985.

MUKHERJEE, T; DE, A; GUPTA, S.S.; CHATTERJEE, A. **Possibility of Dunite Usage in Sintermaking: studies at Tata Steel**. Ironmaking and Steelmaking, London, England, v. 22, n. 1, 1995.

NAGATANI, T. et al.; **Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and inlens system**. Scanning Microsc, USA, v.11, p. 901-909, 1987.

NAJAR, F.J; SANTOS, J.F. **Curso de Sinterização**. Ipatinga: USIMINAS, 1981. p. 32-66,

NASCIMENTO FILHO, V. F., **Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios X por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total (TXRF)**. São Paulo: Departamento de Ciências Exatas, 1999.

NATAL, L. F. G; PEREZ, F. A; SILVA, M. H. R. T; SILVA, A. L; SERRA, A. R. **Utilização de olivina como fundente na sinterização da Cosipa**. Seminário de Redução de Matérias Primas Siderúrgicas, São Paulo , 1995, p. 185-197.

OLIVEIRA, L. G.; LIMA, W. C. P. B.; LIMA, A. G. B. **Transporte de calor em regime permanente em um reator cilíndrico circular de leito fixo: um estudo experimental**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, Paraíba v.6. n. 1, p. 48-58, 2011.

OLIVEIRA, S.S. **Estudo preliminar do uso de finos de topo na formulação de sinter para alto forno**. Marabá: Universidade Federal do Pará, 2009, p. 39.

OOI, T. C. **The effect the charcoal combustion on iron-ore sintering performance and emission of persistent organic pollutants**. Combustion and Flame, Australia, n 158, p. 979-987, 2011.

OYAMA, N.; SATO, H.; TAKEDA, T. **Development of Coating Granulation Sintering Process for Improving Productivity and Reducibility**. Isij International. Japan, v. 45, n. 6, p. 817-826, 2005.

PIETSCH, W. **An Interdisciplinary Approach to Size Enlargement by Agglomeration**. Powder Technology, USA, v.130, p. 8-13, 2003.

QUARESMA, D. S. **Estudo da Sinterização em Reator Vertical de Leito Fixo: Desenvolvimento de Processo para Produção de Agregado Sintético a Partir de Cinza Volante e Biomassa**. Tese de Doutorado – PRODERNA. Universidade Federal do Pará, 2016, p. 159.

ROCHA, S. H. F. S. **Agglomeration of Steelmaking Residues and the Implication of its Use in Blast Furnace and Direct Reduction Processes**. International Steel Conference on new Developments in Metallurgical Process Technologies, Düsseldorf, 2007, p. 1010-1017.

RYU, C., Y. B. YANG, A. KHOR, N. E. YATES, V. N. SHARIFI, and SWITHEBANK, J.. **"Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments—fuel type, equivalence ratio and particle size."** Fuel 85, no. 7-8 (May 2006): 1039-1046.

SILVA, A. C. **Simulação computacional da redução direta de minério de ferro em fornos MIDREX.** 158 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

STARLING, A. R. D. A. R. **Avaliação de metodologias de simulação física.** 162 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.

SUGAWARA, K. **Influência da granulometria do coque na sinterização** – Informação Técnica do Plano de Assistência Técnica N.S.C para Usiminas, Minas Gerais, 1981.

TAKANO, C. **Estudo da influência de alguns combustíveis na sinterização de minério de ferro.** 1970. 110 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1970.

TAKEHARA, L. **Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – fração sinter feed.** 2004. 156 f. Tese (Doutorado em Geociência) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2004.

TELLES, V.B. **Estudo da influencia da sinterização de minérios de ferro na redução por hidrogênio.** 2015. 126 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

THOMÉO, J. C., **Transferência de Calor em Leito Fixo: O Modelo a Dois Parâmetros Tradicional Revisitado.** Tese de Doutorado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, Brasil, 146p. 1995.

UMADEVI, T; DEODHAR, A. V; KUMAR, S; GURURAJ, P. C. S; RANJAN, M. **Influence of coke breeze particle size on quality of sinter.** Ironmaking and Steelmaking, London, England, v. 35, n. 8, p. 567-574, 2008.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola politécnica da Universidade de São Paulo. **Processos de aglomeração de minérios.** São Paulo, 2013.

VIEIRA, C.B; ROSIERE, C.A; PENA, E.Q; SESHADRI, V; ASSIS, P.S. Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterizações nas siderúrgicas e minerações brasileiras: uma análise crítica. **REM**, Ouro Preto, v. 56, n. 2, p. 97- 102, 2003.

WANG, J. H., CHAO, C. Y. H. and KONG, W.. **"Experimental study and asymptotic analysis of horizontally forced forward smoldering combustion."** Combustion and Flame 135, no. 4 (December 2003): 405-419.