



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

DOUGLAS DA SILVA ALVES

**CONSTRUÇÃO E SIMULAÇÃO FÍSICA DO SINTERIZADOR PILOTO
TIPO GREENAWALT**

MARABÁ

2017

DOUGLAS DA SILVA ALVES

**CONSTRUÇÃO E SIMULAÇÃO FÍSICA DO SINTERIZADOR
PILOTO TIPO GREENAWALT**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará em cumprimento as exigências para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof.: Marcio Paulo Mafra de Araújo

Marabá
2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA

Alves, Douglas da Silva

Construção e simulação física do sinterizador de minério piloto tipo Greenawalt / Douglas da Silva Alves; orientador, Márcio Paulo de Araújo Mafra. — 2017.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Materiais, Curso de Engenharia de Materiais, Marabá, 2017.

1. Materiais – Equipamentos e acessórios. 2. Materiais – propriedades mecânicas. 3. Resistência de materiais. 4. Métodos de simulação. I. Mafra, Márcio Paulo de Araújo, orient. II. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. III. Título.

CDD: 23. ed.: 620.11

DOUGLAS DA SILVA ALVES

**CONSTRUÇÃO E SIMULAÇÃO FÍSICA DO SINTERIZADOR DE
MINÉRIO PILOTO TIPO GREENAWALT**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará em cumprimento as exigências para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

DATA DA AVALIAÇÃO: 29/09/2017

CONCEITO: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Eng. Marcio Paulo Mafra de Araújo
(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Orientador)

Prof. Dr. Elias Fagury Neto
(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Membro)

Prof. Msc Alacid do Socorro Siqueira neves
(UFPA – Campus Ananindeua – Membro)

Dedico este trabalho primeiramente a Deus e segundo aos meus pais, pelos bons exemplos que tive na vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus primeiramente por todas as bênçãos concedidas ao longo deste curso (que não foram poucas), pela proteção no dia-a-dia e por nunca deixar que me faltasse motivação e coragem.

Aos meus pais Maria da Penha Reis da Silva e Nilso Alves Duarte, por todo apoio e incentivo.

Aos meus irmãos que sempre me apoiaram.

A minha namorada Diana Ribeiro que sempre esteve me motivando e auxiliando.

Aos amigos dos quais considero parte de minha família, Mário, Marco, Luiz Filipe, Jan Lucas e Danilo, pelos momentos memoráveis como o “Mario’s Cup” e a “noite dos amigos” e por toda a ajuda e ensinamentos no decorrer do curso.

A família Castro/Maues, por todo apoio e amizade ao longo destes 5 anos.

A minha segunda família Luam e tia Lúcia, que foram e são fundamentais em minha vida.

Aos meus coordenadores na Siderúrgica Norte Brasil, Wanderson Rodrigues e Raynner Caldeira, por toda compreensão que tiveram desde o início do curso.

A toda a família suprimentos, pela motivação e apoio.

Ao professor Denilson Costa e a técnica do laboratório de tratamento de minérios Ana Luiza, pelo apoio na realização deste trabalho.

Ao professor Alacid Neves, por toda ajuda e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador Marcio Mafra, pela confiança depositada, pelo apoio nas tarefas e por todo ensinamento no decorrer do curso, até quando me reprovou.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a construção de um sinterizador piloto tipo Greenawalt, e analisar os parâmetros do processo de sinterização, bem como o desempenho do equipamento e a qualidade do sinter produzido. Primeiramente foram analisadas as exigências do processo de sinterização e as necessidades para uma fácil operação do equipamento. A partir destas análises foi desenvolvido um desenho esquemático para a melhor visualização das dificuldades que poderia haver na etapa de montagem. Toda a etapa de montagem do equipamento foi realizada pelo próprio autor, com o auxílio de pessoas com domínio das técnicas de corte e solda. Os materiais utilizados para esta construção em sua grande maioria foram oriundos da reciclagem de sucata ferrosa, que como consequência gerou economia no orçamento do projeto. Após a construção, o sinterizador foi submetido a testes onde se pode verificar o seu desempenho e sua eficiência. O sinter produzido foi analisado quimicamente através do EDS e morfologicamente através do MEV e microscópio óptico, e submetido a testes de resistência e rendimento. Ao final do processo pode-se afirmar que o sinterizador piloto atingiu resultados satisfatórios, conseguindo alcançar temperaturas reais de sinterização e consequentemente produzindo sinteres com boas qualidades para a produção em piloto.

Palavras-chave:

Sinter, Sinterizador piloto, Greenawalt, micropelotização, sinter feed.

ABSTRACT

This work aims the construction of a Greenawalt type pilot sinter, and analyze the sintering processes, as well as the performance of the equipment and the quality of the sinter produced. First, the requirements of the sintering process and the needs for an easy operation of the equipment were analyzed. From these analyzes a schematic design was developed for the best visualization of the difficulties that could exist in the assembly stage. The entire assembly stage of the equipment was carried out by the author himself, with the help of people with mastery of cutting and welding techniques. The materials used for this construction mostly came from the recycling of ferrous scrap, which as a result generated savings in the project budget. After the construction, the sinter was submitted to tests where could be verified its performance and efficiency. The sinter produced was analyzed chemically through EDS and morphologically through and optical microscope, and subjected to resistance and yield tests. At the end of the process it can be stated that the sinter has achieved satisfactory results, achieving real sintering temperatures and consequently producing sinters with good qualities for pilot production.

Key words:

Sinter, Pilot sinter, Greenawalt, micropelletization, sinter feed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo esquemático do processo de sinterização	4
Figura 2 - Desenho esquemático da sinterização proposta por Thomas Huntington e Fherberlein	5
Figura 3 - Desenho esquemático da sinterização proposta Greenawalt	6
Figura 4 - Desenho esquemático do sinterizador piloto projetado por Takano.....	8
Figura 5 - Desenho esquemático da sinterização proposta Dwight-Lloyd.....	10
Figura 6 - Faixa granulométrica ideal do sínter feed	11
Figura 7 - Classificação das partículas de minério de ferro em relação à capacidade de micropelotização.	12
Figura 8 - Temperatura do leito de sinterização em função do tempo de misturas com adições de carvão vegetal em substituição ao coque	15
Figura 9 - Detalhe da modificação de dosagem do calcário e coque fino proposto ..	17
Figura 10 - Estrutura da quase partícula e da estrutura do sínter com o novo método de granulação proposto.....	17
Figura 11 - Processo de aglomeração das partículas.	18
Figura 12 - Processo de micropelotização e as características do micropelotizador.	19
Figura 13 - Desenho esquemático das zonas do processo de sinterização.....	20
Figura 14 - Fluxo para montagem do equipamento.....	24
Figura 15 - Desenho esquemático visão frontal	25
Figura 16 - Desenho esquemático visão lateral	26
Figura 17 - Corte e preparação da panela	28
Figura 18 - Tela usada para a grelha	28
Figura 19 - Soldagem dos flanges, montagem caixa de vento e duto de exaustão. .	29
Figura 20 - Motor exaustor acoplado ao duto.....	29
Figura 21 - Mecanismo de tombamento (lado redutor)	30
Figura 22 - Mecanismo de tombamento (lado oposto ao redutor).....	30
Figura 23 - Montagem da estrutura de sustentação.....	31
Figura 24 - Gaxeta de vibra de vidro utilizada na vedação.	31
Figura 25 - Pintura do equipamento.	32
Figura 26 - Fluxo para simulação física do equipamento.	32
Figura 27- Betoneira usada na micropelotização	34
Figura 28 - Pulverização da água na mistura.....	35
Figura 29 - Processo de determinação da umidade ótima.	36

Figura 30 - Panela preenchida com mistura à sinterizar	37
Figura 31 - Processo de ignição e queima	37
Figura 32 - Sinterizador piloto Greenawalt	39
Figura 33 - Gráfico de análise planejado x realizado	40
Figura 34 - Gráfico da determinação de umidade ótima	41
Figura 35 - Evolução da temperatura	42
Figura 36 - Gráfico de rendimento do sinter	43
Figura 37 - Gráfico de tamboreamento do sinter	43
Figura 38 – Resultado médio quantitativo do EDS	44
Figura 39 - Análise EDS – cálcio-ferrita	45
Figura 40 - Elementos marcados com cores	45
Figura 41 - Análise EDS – SFCA	46
Figura 42 - Análise MEV	46
Figura 43 - Presença de micro poros e hematita primária	47
Figura 44 - Grão de hematita primária	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química do sinter feed.	33
Tabela 2 - Composição granulométrica do sinter feed.	33
Tabela 3 - Composição química do fino carvão.	34
Tabela 4 - Composição química do calcário.....	34

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Planejamento orçamentário do projeto.....	27
--	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivos Gerais	3
1.1.2. Objetivos Específicos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Sinterização: Definição e Conceito	4
2.2. A história da sinterização	5
2.2.1. Sinterização em Batelada – GREENAWALT	6
2.2.2. Sinterização Contínua - Dwight-Lloyd	9
2.3. Matérias Primas	10
2.3.1. Sinter Feed	10
2.3.2. Combustíveis	13
2.3.3. Fundentes	15
2.4. Processo de sinterização	18
2.4.1. Granulação (micropelotização)	18
2.4.2. Fenômeno Físico e Químico	19
2.4.3. Equacionamento químico ^[18]	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1. Construção do equipamento	24
3.1.1. Identificação das necessidades do processo e equipamento	24
3.1.2. Criação do desenho esquemático	25
3.1.3. Planejamento orçamentário	26
3.1.4. Montagem do equipamento	27
3.2. Simulação física do processo de sinterização	32
3.2.1. Matérias primas	33
3.2.2. Micropelotização	34
3.2.3. Determinação da umidade ótima	35
3.2.4. Sinterização	36
3.2.5. Rendimento	37
3.2.6. Teste de tamboreamento	38
3.2.7. Caracterização química e morfológica do sinter	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1. Sinterizador piloto Greenawalt	39
4.2. Simulação física – Resultados	40

4.2.1. Umidade ótima	41
4.2.2. Temperatura	41
4.3. Rendimento da sinterização	42
4.4. Tamboreamento do sinter	43
4.5. Análise química do sinter	44
4.6. Análise morfológica do sinter	46
5. CONCLUSÃO	49
6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	50
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1. INTRODUÇÃO

A sinterização do ferro é um processo de aglomeração de partículas minerais em uma massa porosa chamada sinter. Este é um processo em contra-corrente de componentes gasosos e sólidos que consiste em misturar finos de minérios de ferro com finos de outros materiais sendo a mistura resultante alimentada em uma grelha permeável. As matérias primas utilizadas na composição da mistura de sinterização são: finos de minério de ferro (sinter feed), combustíveis sólidos, fundentes e resíduos siderúrgicos.

O papel da aglomeração é melhorar a permeabilidade da carga e o contato entre os sólidos e o gás redutor e assim baixar a taxa de utilização de combustível e aumentar a velocidade da redução. Outra característica importante do processo de aglomeração é a diminuição da quantidade de poeiras arrastadas para o sistema de gás do alto-forno devido à utilização de sinter em lugar da carga direta de minério de ferro.

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 performance 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. Além destas características busca-se um aglomerado com alto teor de ferro, baixo teor de fósforo e enxofre, pequena quantidade de partículas finas.

O processo de sinterização garante as características exigidas da carga metálica pelo reator siderúrgico. Este processo se destaca entre os processos de aglomeração dada maior flexibilização na qualidade dos produtos visados. Este processo também permite variação na matriz de sinter feeds e ajustes na qualidade do produto através do controle da participação de aditivos, fundentes e combustíveis na mistura de sinterização. Estas flexibilizações possibilitam menor variação do processo de redução e das propriedades do aço a ser produzido. Além da granulometria mais grossa do que as partículas de sinter feed (>5mm a <6,3mm) a boa redutibilidade e resistência mecânica do produto de sinterização reforçam as

vantagens da utilização do sinter como carga metálica do alto-forno para a produção de gusa. Os benefícios trazidos pela aplicação do processo de sinterização levam a maioria das usinas mundiais operarem com carga de sinter em seus altos-fornos superior a 60%.

Assim a importância e a larga utilização de sinter nos processos de fabricação de aço justifica o foco que será dado neste trabalho ao processo de aglomeração por sinterização.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo geral projetar e construir um sinterizador piloto do tipo Greenawalt, a fim de avaliar o processo de sinterização de minério de ferro.

1.1.2. Objetivos Específicos

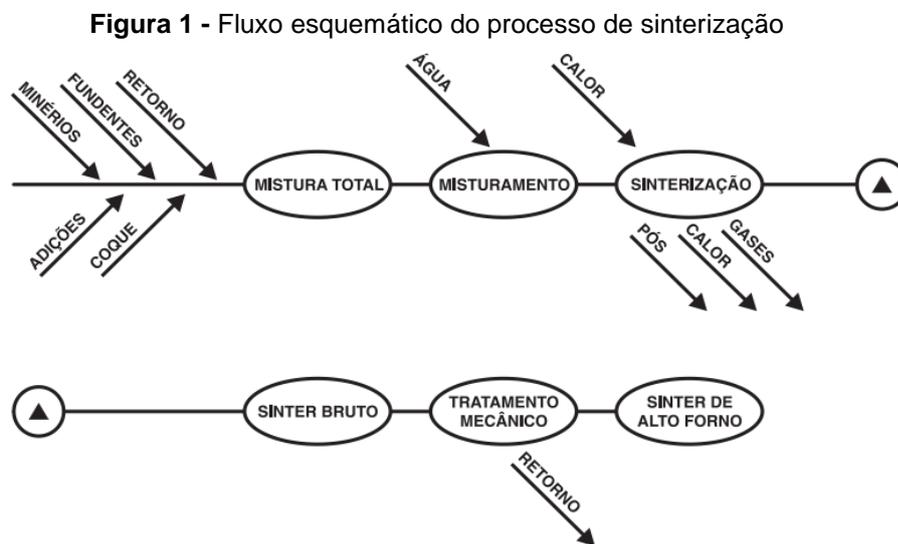
- Identificações das necessidades e funções do equipamento;
- Criação do desenho esquemático (croqui);
- Montagem do equipamento;
- Simulação física do processo;
- Comparar com as condições ideais de uma planta industrial;
- Caracterização do sinter produzido.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sinterização: Definição e Conceito

A sinterização é um processo de aglomeração a quente de uma mistura de finos de minérios, coque, fundentes e adições, com dosagens e composições químicas definidas cujo produto resultante, o sinter, apresente características químicas, físicas metalúrgicas compatíveis com as solicitações do alto-forno.^[1]

O processo de sinterização pode ser definido conforme figura abaixo:



Fonte: NAJAR e SANTOS, 1981^[1]

As principais características exigidas para o sinter são:

- Não conter teores de elementos químicos indesejáveis para o alto forno (ex.: zinco);
- Composição química estável;
- Elevado teor de ferro;
- Baixo volume de escória;
- Elevada resistência mecânica;
- Granulometria adequada;
- Baixa porcentagem de finos;
- Baixa degradação sob-redução;
- Possuir alta redutibilidade;
- Baixo consumo de combustível.

Os sinteres são definidos genericamente como:

- NÃO AUTO-FUNDENTE: Quando é proveniente de minério hematítico ou magnetítico com estéril de sílica e ao qual não se acrescenta nenhuma base (CaO ou MgO).
- AUTO-FUNDENTE: O minério pode ser o mesmo anterior. Mas são acrescentadas algumas bases para correção da composição química. Podem ser ácidos, quando a relação CaO/SiO for inferior a 1, ou básico, quando esta relação for superior a 1. ^[1]

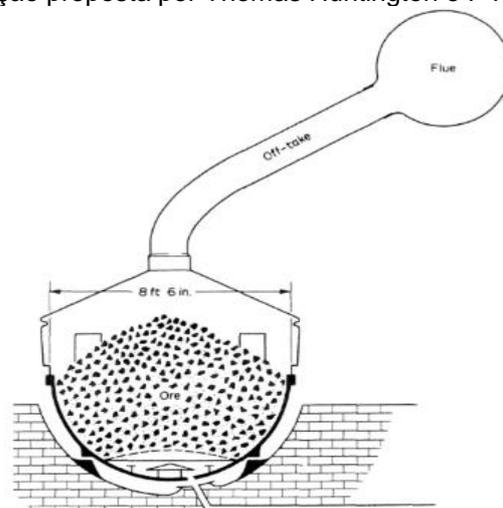
2.2. A história da sinterização

A sinterização é uma dos mais importantes processos de aglomeração da indústria metalúrgica e ceramista. É na verdade uma das mais antigas tecnologias humanas.

O primeiro equipamento industrial de sinterização foi desenvolvido por volta de 1890. ^[2] Em 1897, na Inglaterra, Thomas Huntington e F Herberlein 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. ^[3] Finos de minérios misturados com combustível foram carregados em um leito de carvão dentro de um recipiente, o ar forçado contra a camada provocou a sinterização do leito. ^[2]

A figura 2 mostra um desenho esquemático da sinterização proposta por Thomas Huntington e F Herberlein.

Figura 2 - Sinterização proposta por Thomas Huntington e F Herberlein



Fonte: BALL, D.F *et al*, 1973^[2]

No início do século XX foram desenvolvidas duas rotas para o processo de sinterização:

2.2.1. Sinterização em Batelada – GREENAWALT

A primeira rota, em menor escala, considera o processo de sinterização em batelada ou intermitente. A máquina de sinterização mais famosa desenvolvida a partir dos conceitos de sinterização em batelada foi a máquina cujo layout foi projetado por J.E Greenawalt nos estados unidos. [2]

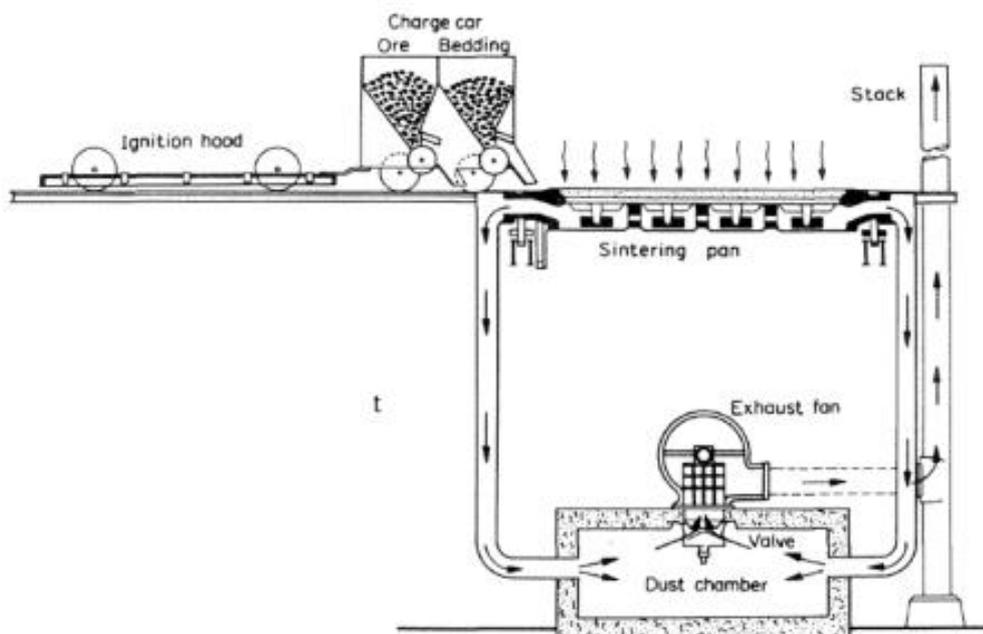
A mistura de sinterização é alimentada na parte superior da máquina. Após o carregamento é acionada os queimadores. Quando a ignição se completa o queimador é retirado e ar é succionado ao longo do leito até que a finalização da sinterização.

Prós: Baixo custo de instalação, facilidade de manutenção com a planta em operação e forno de ignição móvel.

Contras: Baixa produtividade, dificuldade no aumento do leito e manter a uniformidade na ignição.

A figura 3 mostra um desenho esquemático do layout da máquina de sinter desenvolvida por Greenawalt. [2]

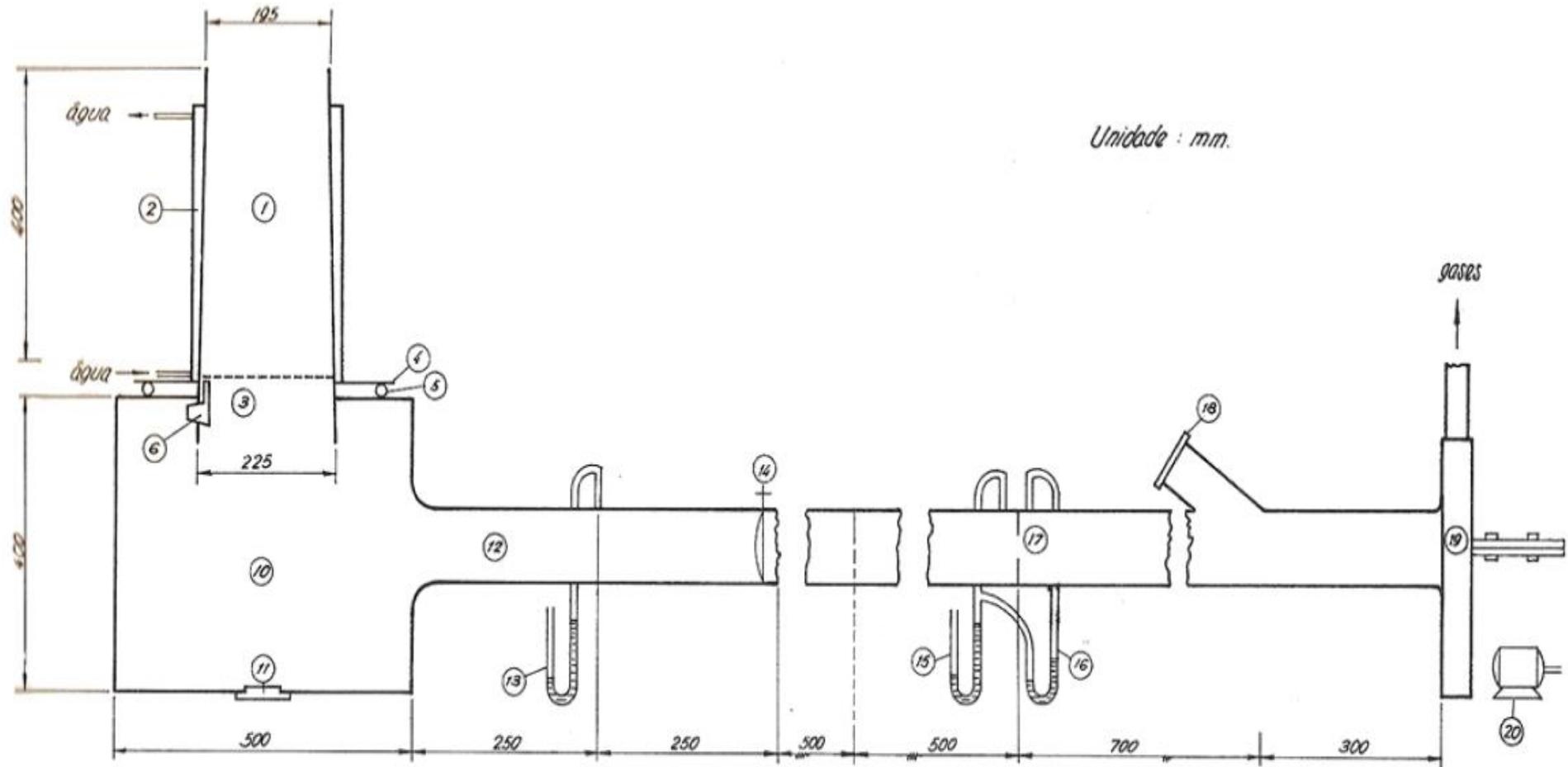
Figura 3 - Sinterização proposta por Greenawalt



Fonte: BALL, D.F et al, 1973 [2]

A fim de melhor apresentar os componentes deste modelo de sinterização, a seguir tem-se o desenho esquemático do sinterizador piloto que pertence ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP. O equipamento foi projetado por Takano ^[4] durante sua pesquisa de doutorado em 1970.

Figura 4 - Desenho esquemático do sinterizador piloto projetado por Takano.



Fonte: TAKANO. C, 1970^[4]

Legenda:

- 1- Câmara ou panela;
- 2- Camisa d'água;
- 3- Grelha de furos tronco cônicos;
- 4- Abras de apoio;
- 5- Vedação de mangueira de borracha;
- 6- Assento da grelha;
- 10-Caixa de vento;
- 11-Abertura para limpeza;
- 12-Tubo de 100 mm de diâmetro;
- 13-Depressão estática;
- 14-Válvula tipo borboleta;
- 15-Depressão estática antes do estrangulamento;
- 16-Pressão estática diferencial;
- 17-Anel Circular com 50 mm de diâmetro do orifício;
- 18-Válvula tipo gaveta;
- 19-Exaustor;
- 20-Motor.

No intuito de uma maior durabilidade da câmara (panela) de sinterização, neste projeto foi inserida uma camisa d'água para a refrigeração da estrutura.

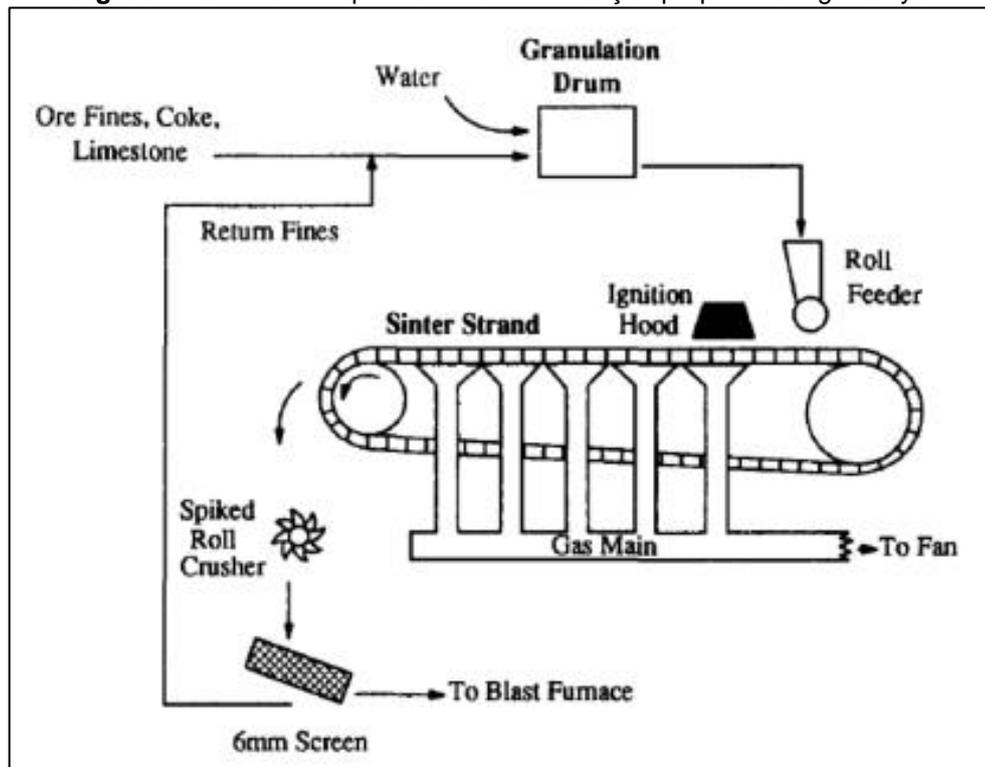
2.2.2. Sinterização Contínua - Dwight-Lloyd

A segunda rota considera o processo contínuo de sinterização. Este foi desenvolvido entre 1903 a 1906 por Dwight and Lloyd no México para a sinterização de cobre. Logo depois algumas plantas com o mesmo layout foram construídas para a sinterização de minério de ferro. Hoje em dia as máquinas de sinterização contínua são utilizadas em larga escala.

A principal característica desta rota de sinterização é a grelha móvel. Na parte inferior da grelha existe um sistema de exaustão que succiona o ar quente, após a ignição, ao longo da camada de mistura, provocando a sinterização do leito.^[2]

A figura 5 mostra um desenho esquemático da máquina de sinter desenvolvida por Dwight-Lloyd

Figura 5 - Desenho esquemático da sinterização proposta Dwight-Lloyd



Fonte: HINKLEY, J. *et al*, 1994 ^[5]

Prós: Alta produtividade, ignição uniforme e facilidade no aumento na altura do leito;

Contras: Alto custo de instalação, dificuldade de manutenção com equipamento em funcionamento.

Apenas após 1940 a sinterização começou a ser estudada científica e fundamentalmente. Desde então importantes desenvolvimentos deste processo vem sendo atingido.

2.3. Matérias Primas

2.3.1. Sinter Feed

A principal característica analisada no minério de ferro para a sinterização (sinter feed) é a distribuição granulométrica. Por vários anos, a referencia granulométrica ideal de um sinter feed era a curva de Astier, que limitava o tamanho máximo do minério a 6,35mm e o mínimo em 0,106mm (150mesh). Entretanto, fatores como o surgimento de novas tecnologias na preparação de misturas e a

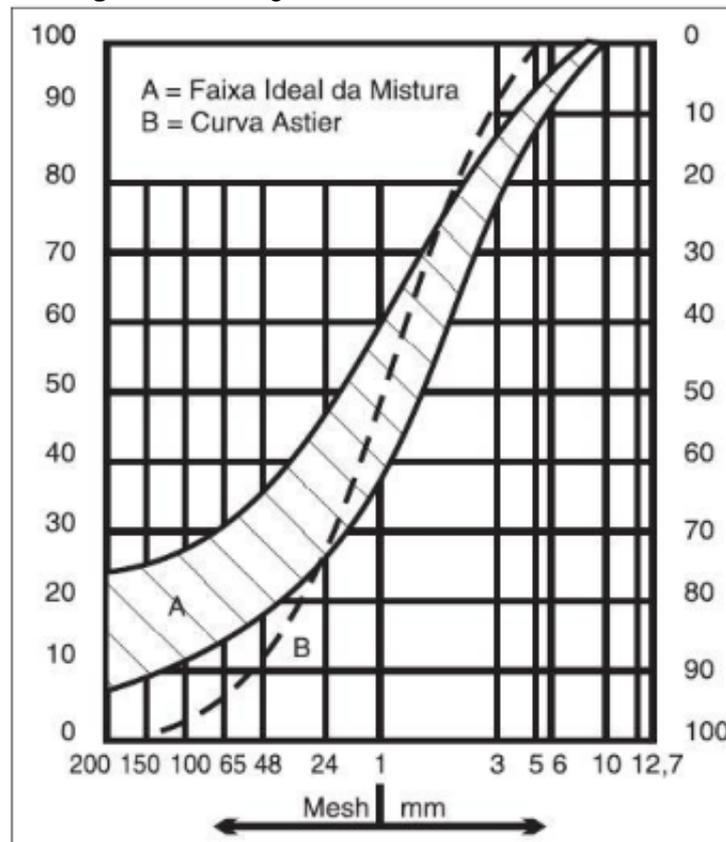
necessidade de se trabalhar com uma mistura de minério ao invés de um único tipo, possibilitaram uma faixa granulométrica mais ampla e flexível.^[6]

A figura 6 mostra a distribuição granulométrica conforme a curva de Astier e a faixa granulométrica aceitável nas sinterizações atuais.

A distribuição granulométrica do sinter feed deve conter:^[6]

- 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 6 - Faixa granulométrica ideal do sinter feed

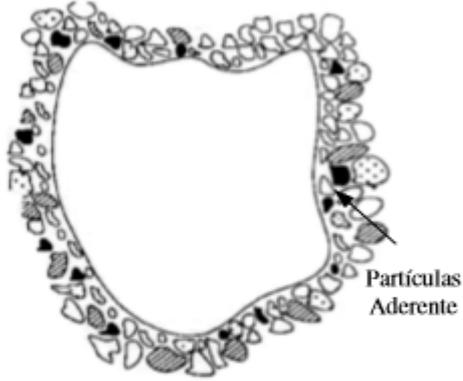


Fonte: HONORATO. E.P, 2005^[6]

As partículas de minérios de ferro podem ser classificadas quanto à capacidade de micropelotização. A figura 7 mostra a classificação adotada pela Nippon Steel.^[7,8]

As partículas situadas no intervalo entre 0,7 e 6,3mm são consideradas como nucleantes. As partículas situadas entre 0,2 e 0,7mm são consideradas intermediárias e acima de 0,106mm (150mesh) até 0,2mm são denominadas como aderentes. [7]

Figura 7 - Classificação das partículas de minério de ferro em relação à capacidade de micropelotização.

Partículas do <i>sinter feed</i>		Estrutura ideal do microaglomerado (a frio)
6,3 mm	Supergrossas Não apresentam a capacidade de aderir as partículas mais finas ao seu redor e não contribuem para o fenômeno de microaglomeração a frio. Devem ser minimizadas na composição da mistura a sinterizar.	 <p>Partículas Aderente</p>
	<p>Nucleantes 2</p> <p>Nucleantes Apresentam a capacidade de aderir as partículas mais finas ao seu redor e constituem-se nos núcleos dos aglomerados. São partículas policristalinas anídras ou hidratadas e não devem participar efetivamente no fenômeno de formação de líquido durante a queima. Deve-se controlar a quantidade de partículas nucleantes goethíticas (altos valores de PPC e de P) de modo a evitar a alta contração e formação de grandes trincas no bolo de sinterização e aumento do teor de fósforo no sinter e no gusa.</p>	
3,0 mm	<p>Nucleantes 1 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 sinter. Não devem conter sílica oclusa na sua estrutura ou mesmo na forma liberada.</p>	<p>Tramas das Partículas Nucleantes Granoblástica: Cristais xenomorfos de hematita complexamente intercrecidos (Ex. Minas de Mutuca, C. Feijão, Carajás, etc.) Lepidoblástica: Cristais orientados de hematita ao longo do plano basal (Ex. Minas de Andrade, Cauê, Morro Agudo, etc.) Mosaico: Cristais de bordas retas sem orientação preferencial. (Ex. Minas de Casa de Pedra, Cauê, Andrade, etc.) Microgranular: Hematita microcristalina disposta em uma trama granoblástica (Ex. Minas de Carajás e Corumbá). Treliça: Cristais alongados sem orientação preferencial (Ex. Minas de Carajás).</p>
1,0 mm ou 0,7 mm	<p>Intermediárias 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: Especularísticas (Ex. Minas de Cauê, Andrade, etc.). Martíticas (Ex. Minas da Mutuca, C. Feijão, etc.). Granulares (Ex. Mina do Pico, etc.). Microgranulares (Ex. Mina de Carajás). Magnetíticas (Ex. Mina de C. Feijão, etc.). Goethíticas (Ex. Minas de Alegria, Capanema, etc.).</p>
0,3 mm ou 0,2 mm	<p>Aderentes São partículas que formam a camada aderente ao redor do núcleo no microaglomerado. Podem apresentar diferentes características mineralógicas de modo a influenciar fortemente os fenômenos de aglomeração a frio e de formação da fase líquida durante a queima e na qualidade intrínseca do sinter formado.</p>	
0,105 mm	<p>Superfinas 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 sinter.</p>	

Fonte: ISHIKAWA. Y, 1982 [7]

A composição química do sinter feed na mistura a sinterizar depende da quantidade de sinter presente na carga metálica do alto-forno, da quantidade e tipo de escória que deseja obter na fabricação do ferro gusa e da qualidade do gusa. [9]

A preocupação com os limites de natureza química dos minérios resume-se aos teores de fósforo, sílica e alumina. Em geral, os minérios de ferro brasileiros possuem baixos teores de enxofre, titânio e álcalis. [6]

Evita-se a utilização de minérios que possuam concentrações de sílica nas frações mais grossas, pois neste caso nem toda a sílica participa das reações, diminuindo o volume da escória e tornando o sinter mais frágil. [7]

Nas reações de sinterização, a participação da alumina localizada nas frações mais grossas é quase nula. O problema ocorre quando a alumina se concentra as frações mais finas participa intensamente nas reações de sinterização, dissolvendo-se na rede da hematita secundária. Estas reações fragilizam o sinter através do aumento do RDI, gerando mais finos durante a redução. [7]

Adições de magnetita, MgO e CaO no leito de sinterização, podem amenizar os efeitos negativos da alumina. Estas adições melhoram as propriedades do sinter durante a redução, ou seja, diminui o RDI (índice de degradação sob-redução) do sinter, conseqüentemente reduz a geração de finos durante a redução. [10]

Devidos aos problemas causados pelo fósforo nos altos-fornos, este elemento também é restrito no sinter. O fósforo possui uma baixa taxa de eliminação através da escória do alto forno e prejudica a fabricação de aços mais nobres. [6]

2.3.2. Combustíveis

O combustível mais utilizado nas plantas de sinterização é a moinha de coque (finos de coque). [11]

Os combustíveis são utilizados no processo de sinterização com a finalidade de fornecer energia para sustentar a frente de queima no leito de sinterização e para efetuar a ignição do processo. [6]

Nas usinas de pequeno porte, que utilizam fornos a carvão vegetal, sobram finos do combustível. Deste modo, é feito um reaproveitamento destes finos com a finalidade de substituir o coque. [16]

Na ignição do reator de sinterizar, geralmente são usados combustíveis líquidos ou gasosos. Muitas vezes são aproveitados combustíveis provenientes de

processos industriais paralelos com o gás de coqueria ou alto-forno, também podem ser empregados óleos ou gás natural. ^[6,9]

O tamanho das partículas do combustível influencia na porosidade, nas fases formadas e na redutibilidade e resistência do sinter. ^[11]

Tamanhos maiores das partículas de coque aumentam o RDI do sinter, devido ao maior tamanho de poros formados, ou seja, o sinter gerou finos com mais facilidade durante a redução. Em contrapartida, o aumento do número de poros aumenta o RI (índice de redutibilidade) do sinter. Deste modo, o combustível não deve ser nem tão fino, para evitar a produção de sinteres com baixo RI, e nem tão grossos, para não formar sinteres frágeis. ^[11]

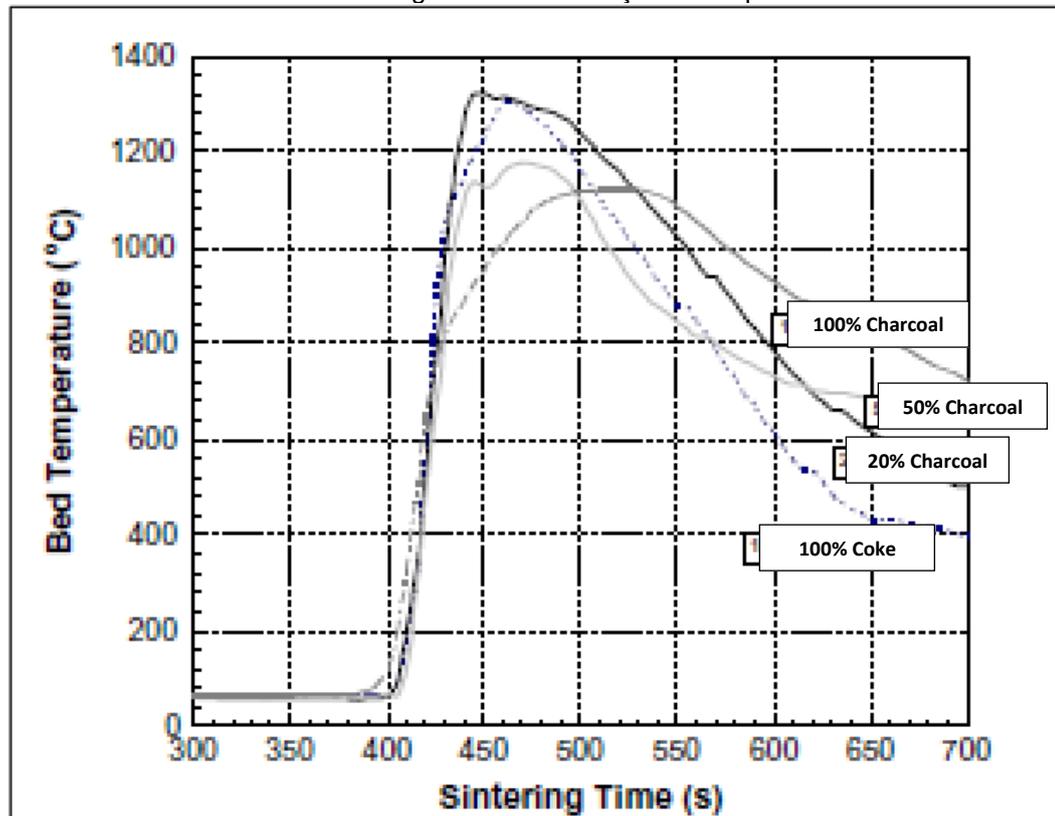
O coque é um insumo mineral e sua extração causa danos permanentes no solo. Por outro lado, o carvão vegetal é obtido através da carbonização da madeira. Deste modo, os danos causados pela extração da madeira podem ser minimizados através das técnicas de remediação e reflorestamento. ^[12]

A combustão de coques nas plantas de sinterização contribui para a geração de gases causadores do efeito estufa, e ainda SO_x e NO_x . Já o carvão vegetal é pobre em enxofre e nitrogênio, o que reduz as emissões de gases associados a estes elementos durante o processo de combustão. Este combustível também possui a vantagem de ser renovável, fazendo com que as emissões de CO_2 geradas durante sua produção sejam sequestradas durante o ciclo de vida da biomassa. ^[12]

Combustíveis mais reativos aumentam a velocidade da propagação de frente de combustão, aumentando a produtividade. Porém, combustíveis mais reativos diminui a resistência a frio do sinter. ^[13]

A figura 8 mostra a diferença das temperaturas durante a sinterização de misturas com adições de carvão vegetal. ^[14]

Figura 8 - Temperatura do leito de sinterização em função do tempo de misturas com adições de carvão vegetal em substituição ao coque



.Fonte: LOVEL, R. 2009 ^[14]

A substituição de coque por carvão vegetal diminui os picos de temperatura no processo de sinterização. Combustíveis mais reativos que o coque aumenta a relação CO/CO_2 no interior do leito de sinterização. ^[4]

Além disso, o carvão vegetal possui menor quantidade de carbono fixo e uma quantidade maior de materiais voláteis. ^[14]

2.3.3. Fundentes

Os fundentes têm como função básica escorificar as impurezas introduzidas na carga, pelos minérios e pelo combustível sólido, formando uma matriz de escória capaz de promover a coesão dos grãos dos minérios, de modo a proporcionar ao sinter uma resistência adequada à sua utilização no alto-forno.

Os fundentes são classificados em: ^[6]

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

Conforme a ganga dos minérios seja de natureza ácida ou básica, deve-se trabalhar, respectivamente, com fundentes básicos ou ácidos, de maneira a produzir-se um sínter de basicidade compatível com a marcha operacional do alto-forno. ^[6]

Os principais fundentes usados em sinterização são o calcário, cal, serpentinito, dunito, dolomita e quartzito (areia). ^[6]

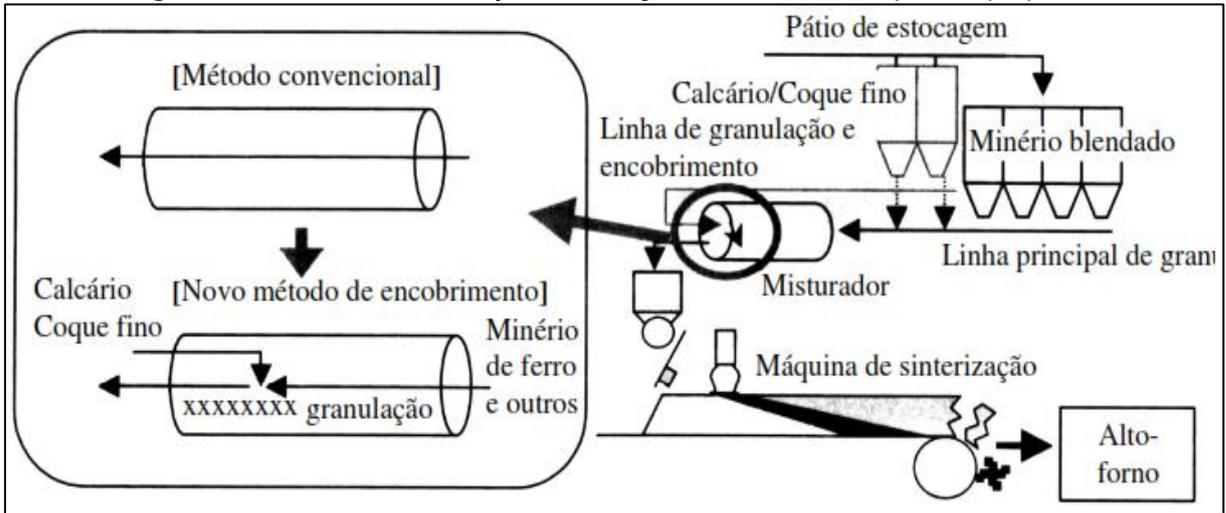
É usual estabelecer-se uma diferenciação entre fundentes e adições. As adições, quando usadas, servem para corrigir alguma característica da mistura ou com vistas ao reaproveitamento de resíduos gerados na operação da usina. Exemplos de adições: carepa de laminação, pó de alto-forno, escória de alto-forno, minério de manganês etc. Desde que esses materiais, fundentes e adições, devem incorporar-se totalmente ao sínter é imprescindível que apresentem características físicas e químicas que viabilizem sua utilização. ^[6]

Trabalhos recentes como o de Oyama N. *et al* ^[6] apresentam resultados mostrando a importância da correta adequação granulométrica do principal fundente, o calcário, de tal forma que sua participação na granulação, possa favorecer a uma melhor estrutura do sínter, com ganhos nas propriedades metalúrgicas do produto. ^[6]

Inclusive neste estudo, os autores sugerem a modificação da forma de dosagem do calcário com o combustível no misturador da sinterização, alterando as características das quase partículas formadas. ^[6]

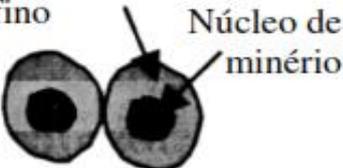
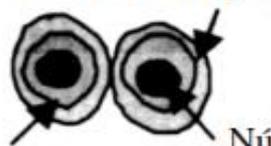
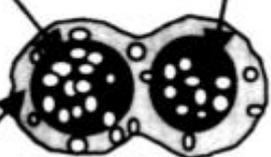
As figuras 9 e 10 trazem uma maior compreensão desta modificação.

Figura 9 - Detalhe da modificação de dosagem do calcário e coque fino proposto



Fonte: OYAMA *et al*, 2005 [16]

Figura 10 - Estrutura da quase partícula e da estrutura do sínter com o novo método de granulação proposto.

	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)	Micro poro Hematita primária (baixo RDI/alto RI) 

Fonte: OYAMA *et al*, 2005 [16]

A hematita primária é a hematita original, remanescente dos minérios hematíticos, parcialmente assimilada no processo de sinterização, e a hematita secundária foram formadas por diferentes mecanismos durante a sinterização,

como: precipitação direta da fase líquida, oxidação da magnetita ou por desprendimento dos cristais externos das partículas de minério de ferro. Este tipo de hematita ocorre principalmente circundando partículas de hematitas primárias e ao redor dos poros internos do sinter, tendo uma fase vítrea. [15]

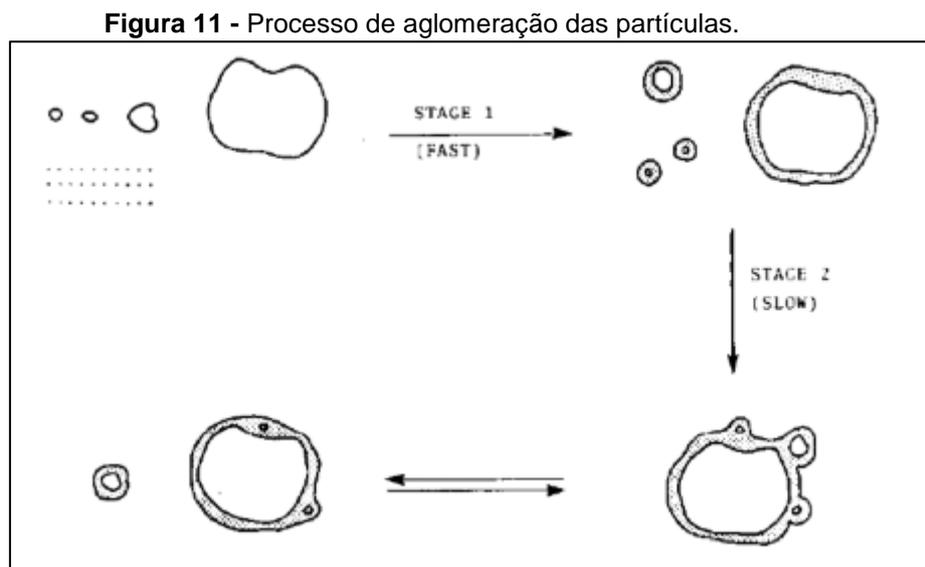
2.4. Processo de sinterização

2.4.1. Granulação (micropelotização)

A preparação da mistura para a sinterização contempla além da pesagem, composição e mistura de seus componentes numa etapa de granulação. Nesta etapa os finos de minério de ferro são aglomerados em um tambor rotativo com adição de água. O objetivo desta etapa é aglomerar as partículas finas nas partículas grossas em um mecanismo de auto assentamento de grânulos. [16]

A adição de água favorece a ligação entre as partículas sólidas da mistura constituindo uma ponte de ligação entre as partículas propiciando assim a formação de grânulos. A tensão superficial da água aproxima as partículas sólidas aumentando a resistência dos grânulos. [17]

A figura 11 demonstra este processo.



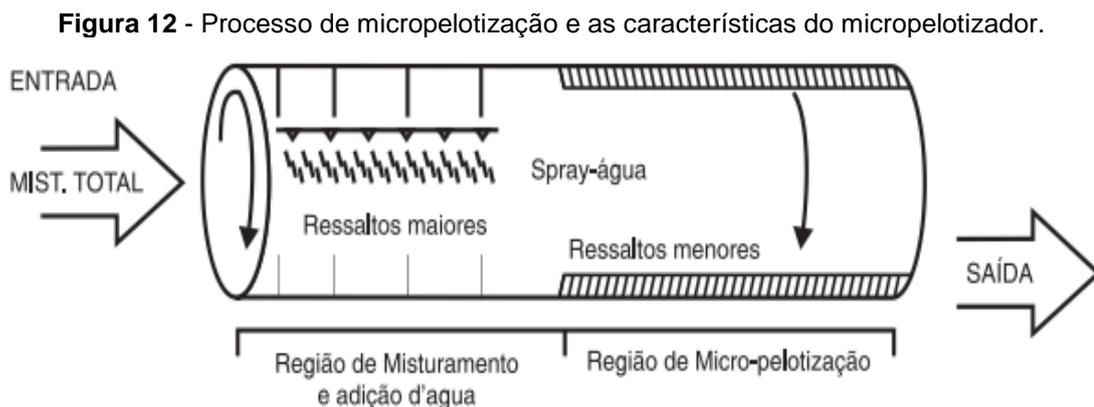
Fonte: LITSTER e WATERS, 1988 [19]

A granulação da mistura de sinterização é uma etapa chave do processo de sinterização, pois a distribuição granulométrica dos grânulos formados afeta

diretamente a permeabilidade do leito de sinterização e conseqüentemente a produtividade e eficiência de queima dos combustíveis impactando na qualidade do sinter.^[17]

A eficiência do processo de granulação é diretamente relacionada tanto aos parâmetros de processo quanto às propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos componentes da mistura de sinterização. Quantidade de material no misturador, o tempo de residência e a velocidade de rotação do tambor são parâmetros de processos a serem controlados para a obtenção de boa eficiência de granulação. Densidade, porosidade, formato e tamanho médio de partículas, distribuição granulométrica das partículas, umidade ótima dentre outras são propriedades da mistura que afetam a granulação.^[18]

A figura 12 exemplifica o processo de micropelotização e as características do micropelotizador.



Fonte: NAJAR e SANTOS, 1981^[1]

2.4.2. Fenômeno Físico e Químico

O mecanismo de sinterização é determinado por dois fenômenos distintos: Fenômeno físico de transferência de calor e o fenômeno químico de combustão do carbono. Estes fenômenos são interdependentes, e definem as zonas de sinterização e o desenvolvimento do processo. O equilíbrio entre os dois fenômenos determina a qualidade da queima, o desempenho do processo de sinterização, o consumo de combustível e a qualidade do produto.^[20]

O fenômeno químico consiste na queima do combustível presente na mistura de sinterização que produzindo calor, gera uma frente de reações químicas. A

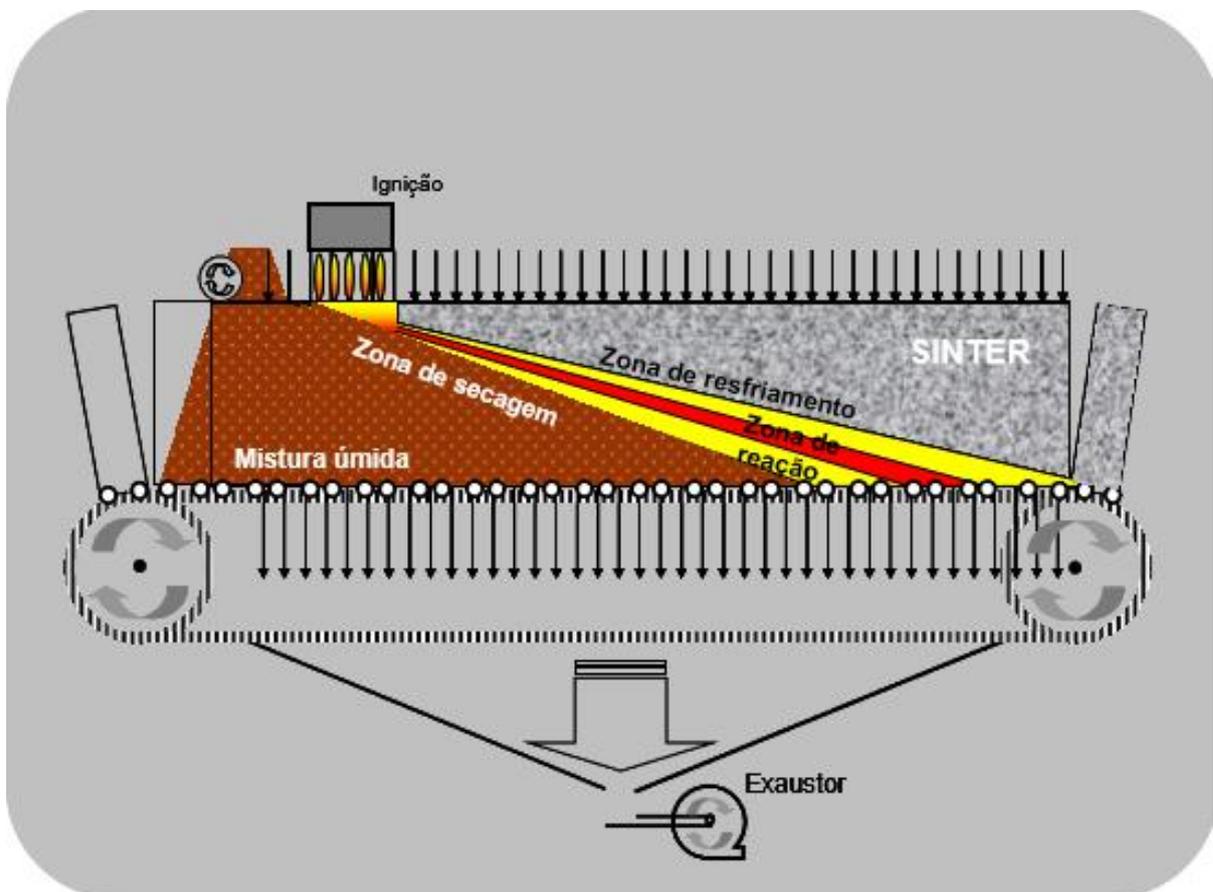
evolução da frente está diretamente relacionada à quantidade e a reatividade dos combustíveis sólidos, da umidade, composição química da mistura além de algumas características químicas e mineralógicas dos minérios da mistura. [21]

Já o fenômeno físico consiste na transferência de calor da camada superior para a inferior proporcionada pela sucção forçada de ar formando uma frente térmica. A velocidade de propagação da frente térmica é proporcional à vazão de ar, a altura da camada, umidade e distribuição granulométrica da mistura, intensidade da ignição dentre outros fatores. [21]

2.4.3. Equacionamento químico [18]

O processo de sinterização pode ser dividido em zonas: úmida, de secagem, de reação e de resfriamento. A figura 13 ilustra as zonas do processo de sinterização.

Figura 13 - Desenho esquemático das zonas do processo de sinterização.



Fonte: STARLING, 2012. [18]

- **Zona úmida:** constitui a base do leito de mistura a sinterizar. Nesta zona os materiais encontram-se conforme saíram da etapa de granulação. A temperatura máxima atingida é de 100° C. As principais reações que ocorrem nesta etapa são a hidratação da cal e a condensação dos vapores de água. As equações (2.1) e (2.2) representam as reações mencionadas.

✓ Hidratação da cal

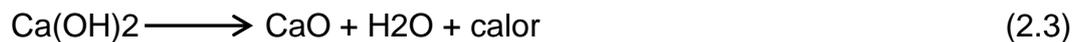


✓ Condensação dos vapores de água



- **Zona de secagem:** Nesta região ocorre a vaporização da umidade da mistura e a desidratação dos hidróxidos. As temperaturas variam de 100° C a 500° C. As principais reações que ocorrem nesta etapa são a desidratação do hidróxido de cálcio e a vaporização da umidade. As equações (2.3) e (2.4) representam as reações mencionadas.

✓ Desidratação do hidróxido de cálcio



✓ Vaporização da umidade



- **Zona de reações:** Esta região compreende toda a região térmica de aquecimento acima de 500° C. Nestas temperaturas há a ignição do carbono até o início do resfriamento do sinter, ocorrendo reações simultaneamente reações químicas e aglomerantes. Dentre elas: combustão do carbono, decomposição dos carbonatos, reações na fase sólida, redução e re-oxidação dos óxidos de ferro e reações de formação da escória.

- ✓ **Reação de combustão:** do combustível carbonoso que leva a formação de CO e CO₂. Ocorre a elevação de temperatura de 500° C até 1400°C.

As equações (2.5) e (2.6) representam as reações mencionadas.



- ✓ **Reações de decomposição dos carbonatos:**



- ✓ **Reações na fase sólida:** Uma boa homogeneização da mistura de sinterização é muito importante para o contato entre partículas de minério. O contato de CaO e SiO₂, é um fator determinante para a ocorrência das reações sólido-sólido. Durante o aquecimento da mistura na máquina de sinterização, o contato entre as partículas de CaO e SiO₂, favorece a formação de cálcio-ferritas, fayalitas e silicatos.
- ✓ **Reações de redução e re-oxidação:** ocorrem desde a zona superior de aquecimento até o início do resfriamento.
- ✓ **Reações de formação de escória:** que ocorrem na frente de combustão. Os componentes da carga, após as reações na fase sólida, entram em estado de semi-fusão e em seguida se recristalizam. Os silicatos (2CaO. SiO₂ e 3CaO.SiO₂) são os principais produtos destas reações.
- ✓ **Reações de aglomeração:** Estas reações ocorrem em etapas a temperaturas maiores que as temperaturas de fusão dos materiais (reações entre sólido-líquido e reações líquido-líquido).

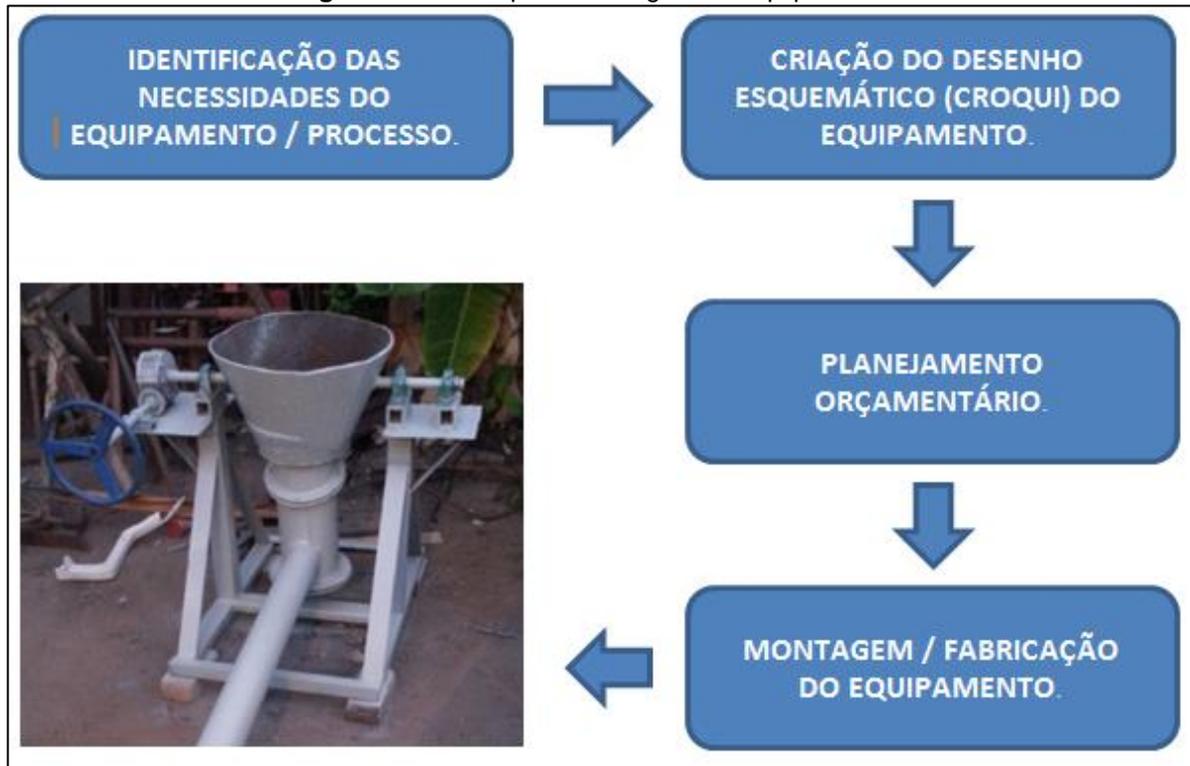
- ❖ Inicialmente, em temperaturas próximas de 1100°C ocorre uma reação sólido-sólido da hematita com CaO levando a formação de cálcio-ferritas.
- ❖ A 1200° C inicia-se a formação da fase líquida da cálcio-ferritas. Em forma líquida a cálcio-ferrita rica em CaO e Fe₂O₃ começa a incorporar alguns óxidos presentes nos minérios como SiO₂, Al₂O₃ e MgO. A fase líquida leva a desintegração superficial da hematita e a consequente formação da hematita granular.
- ❖ Após a incorporação de MgO e Al₂O₃, ocorre a reação entre a fase líquida e hematitas. Estas reações levam a formação de cálcio-ferritas sólidas aciculares ricas em Al₂O₃ e SiO₂.
- ❖ Se temperaturas acima de 1300°C não forem atingidas ou se tempo de residência nesta faixa de temperatura for muito pequeno haverá, após o resfriamento, a formação de um produto heterogêneo. Este produto é assim classificado por ser rico micro estruturalmente em cálcio-ferritas arredondadas imersas em uma matriz e de silicatos cristalizados e hematitas granulares.
- ❖ Se temperaturas superiores a 1300°C forem atingidas haverá a formação de um produto homogêneo. Atingindo este nível térmico, a tendência do cálcio-ferrita é se aglomerar com partículas grossas de minério fundido formando hematita ou magnetita e escoria vítrea. Durante o resfriamento precipitados de hematita da fase líquida e cálcio-ferritas cristalizam na forma de flocos longos denominados forma colunar. Características típicas do sinter homogêneo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Construção do equipamento

Para facilitar o entendimento da metodologia realizada nesta etapa do trabalho, a figura 14 apresenta as principais fases.

Figura 14 - Fluxo para montagem do equipamento.



Fonte: Autor

3.1.1. Identificação das necessidades do processo e equipamento

Inicialmente foi pensado nas necessidades do processo, como:

- Ignição da queima;
- Fluxo de ar constante e abundante;
- Troca de calor;
- Avanço da frente de queima.

Em seguida nas necessidades do equipamento para que atenda as exigências do processo e que facilite a operação do mesmo:

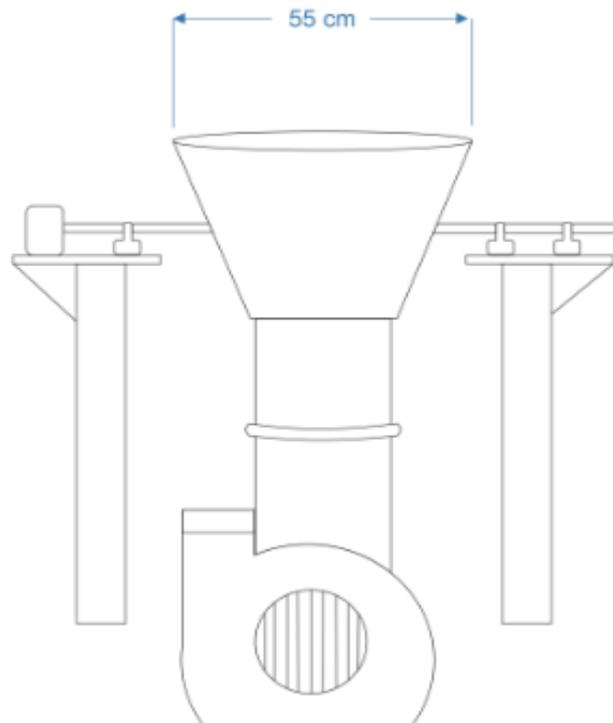
- Motor exaustor;

- Duto de exaustão;
- Caixa de vento;
- Painel ou câmara de sinterização;
- Mecanismo de tombamento da panela;
- Mecanismo de ignição;
- Vedação eficiente;
- Grelha.

3.1.2. Criação do desenho esquemático

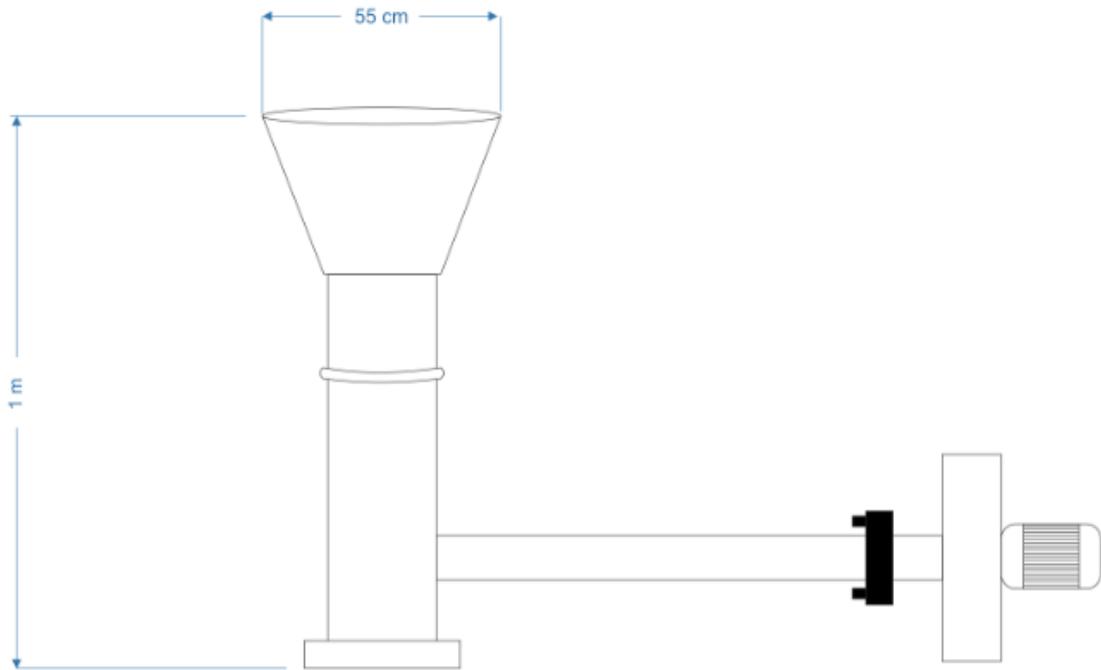
Nesta fase foi criado o desenho esquemático no intuito de visualizar com maior eficiência o designer e os desafios que encontraríamos durante a montagem do equipamento. Para esta tarefa foi utilizado o software Corel Draw[®] que possibilitou termos a visão geral do equipamento, conforme mostram as figuras 15 e 16.

Figura 15 - Desenho esquemático visão frontal



Fonte: Autor

Figura 16 - Desenho esquemático visão lateral



Fonte: Autor

3.1.3. Planejamento orçamentário

Com a finalidade de estimar todos os investimentos, foi montado um planejamento orçamentário incluindo os materiais de aplicação, matérias de consumo e serviços a serem adquiridos e executados.

O quadro 1 demonstra esta fase do projeto.

Quadro 1 - Planejamento orçamentário do projeto

Planejamento Orçamentário		
TIPO	DESCRIÇÃO	VALOR (R\$)
Serviço / Mão de obra	Soldagem e Corte	500,00
	Torneamento	150,00
Materiais de aplicação	Motor Exaustor	700,00
	Maçarico tipo tocha	60,00
	Fixação (parafusos, porcas e arruelas)	30,00
	Juntas de vedação ou gaxeta	50,00
	Rolamentos e mancais	220,00
	Ferragens (barras, cantoneiras e tubos)	400,00
Materiais consumo	Eletrodo de solda	50,00
	Discos de corte e desbaste	50,00
Investimento total planejado		2.210,00

Fonte: Autor

3.1.4. Montagem do equipamento

O local da montagem do equipamento foi em oficina própria do autor, devido a disponibilidade de equipamentos como maquina de solda, furadeira, esmerilhadeira, chaves e etc.

A montagem do equipamento teve inicio pela panela de sinterização, onde foi preparada uma peça de aço com formato afunilado (a fim de facilitar a desmoldagem do sinter), com parede medindo $\frac{1}{2}$ ", e inicialmente com altura de 1.000mm que posteriormente foi cortada, diminuindo a altura para 500mm.

A figura 17 demonstra este processo.

Figura 17 - Corte e preparação da panela



Fonte: Autor

Para a grelha foi utilizada uma tela de aço com abertura de 10mm e fios de 3mm, conforme demonstra a figura 18.

Figura 18 - Tela usada para a grelha



Fonte: Autor

Fixado logo abaixo da panela ficam a caixa de vento e o duto de exaustão, que são responsáveis por conduzirem os gases gerados na sinterização até o motor exaustor. Neste projeto foram escolhidos para estas funções dois tubos de aço: um de 10" para a caixa de vento e outro de 6" para o duto de exaustão, dos quais foram preparados com flanges para fixação.

Demonstrado na figura 19.

Figura 19 - Soldagem dos flanges, montagem caixa de vento e duto de exaustão.



Fonte: Autor

Para atender a necessidade de fluxo de ar constante, foi escolhido um motor com potencia de 2 CV, trifásico 220V~440V e rotação de 3.200 RPM, e um exaustor de aço inoxidável, tipo sirocco, tendo vazão máxima de 100.000 m³/h. Este foi acoplado ao fim do duto de exaustão, conforme a figura 20.

Figura 20 - Motor exaustor acoplado ao duto.



Fonte: Autor

Para facilitar a operação do equipamento e o desmolde do sinter foi idealizado um mecanismo para o tombamento da panela, utilizando redutor de velocidade, eixos, rolamentos e mancais.

As figuras 21 e 22 mostram o mecanismo.

Figura 21 - Mecanismo de tombamento (lado redutor)



Fonte: Autor

Figura 22 - Mecanismo de tombamento (lado oposto ao redutor).



Fonte: Autor

Para a função de sustentação do equipamento foi montada uma estrutura utilizando cantoneiras, chapas e perfis, onde foi pensado nas forças causadas pelo movimento de tombamento da panela e peso do sinter a ser produzido. Conforme mostra a figura 23.

Figura 23 - Montagem da estrutura de sustentação



Fonte: Autor

Na vedação de todos os flanges foi utilizada gaxeta de vibra de vidro com amianto, medindo $\frac{1}{2}$ " de diâmetro, a mesma pode ser visualizada através da figura 24.

Figura 24 - Gaxeta de vibra de vidro utilizada na vedação.



Fonte: Autor

E por último o trabalho de lixamento e pintura do equipamento como podemos ver na figura 25.

Figura 25 - Pintura do equipamento.



Fonte: Autor

3.2. Simulação física do processo de sinterização

Para facilitar o entendimento da metodologia realizada nesta etapa do trabalho, a figura 26 apresenta as principais fases.

Figura 26 - Fluxo para simulação física do equipamento.



Fonte: Autor

3.2.1. Matérias primas

As matérias primas utilizadas neste trabalho foram sinter feed (carga metálica), fino de carvão vegetal (combustível) e calcário (fundente), todos esses cedidos por uma siderúrgica localizada na cidade de Marabá-PA.

- **Sinter feed:** Este material consiste na carga metálica para o processo, trata-se de um minério hematítico com partículas predominantemente finas, oriundo da mina de Carajás. A composição química e a granulometria podem ser observadas através das tabelas 1 e 2.

Tabela 1- Composição química do sinter feed.

Material	Fe _{Total}	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂
SFH	60,15%	3,37%	1,89%	2,42%	0,18%	0,16%

Fonte: Autor

Tabela 2 - Composição granulométrica do sinter feed.

Peneira retida (mm)	% Retido	% Acumulado
6,35	11,56	11,56
4,75	28,80	40,36
3,30	56,00	96,37
1,00	1,34	97,56
0,50	0,22	97,73
0,25	0,22	97,95
0,00	2,04	100,00
Total	100,00	100,00

Fonte: Autor

- **Combustível e fundentes:** O combustível utilizado foi o fino de carvão vegetal e o fundente usado foi o calcário, (este ultimo escolhido devido a baixa basicidade do sinter feed), ambos com granulometria entre 4,75mm e 1mm. As composições químicas de cada um podem ser observadas através das tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Composição química do fino carvão.

Material	C _{Fixo}	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O
FCV	73,74%	12,30%	0,25%	5,18%	0,44%	0,58%	0,99%

Fonte: Autor

Tabela 4 - Composição química do calcário.

Material	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O
FCV	59,17%	3,94%	1,38%	0,19%	0,44%	0,09%

Fonte: Autor

Antes da micropelotização, estes materiais foram colocados numa estufa a 100°C durante 12 horas, para que assim pudesse eliminar toda umidade.

3.2.2. Micropelotização

Antes da sinterização é realizado o processo de micropelotização, esta etapa acontece a mistura das matérias primas juntamente com água (umidade controlada), para permitir o aumento da permeabilidade no leito sinterização, aumentando o fluxo do oxigênio e dos gases gerados no processo.

Foi utilizada uma betoneira de 120 litros, conforme mostra a figura 27.

Figura 27- Betoneira usada na micropelotização

Fonte: Autor

A betoneira utilizada a velocidade era fixa de 32 RPM e sua inclinação foi ajustada visualmente, de forma que possibilitasse maior contato entre as partículas, formando da melhor maneira possível as micropelotas.

Neste trabalho foi utilizada uma mistura de 10 kg, sendo 80% de sinter feed, 10% de combustível (carvão vegetal) e 10% de fundente.

3.2.3. Determinação da umidade ótima

Este método define a quantidade de água necessária para formar as micropelotas na mista e conseqüentemente a menor densidade aparente.

Inicialmente a mistura foi colocada na betoneira e a cada 2 minutos era acrescentado 1% de água com a ajuda de um pulverizador. Este procedimento é mostrado na figura 28.

Figura 28 - Pulverização da água na mistura

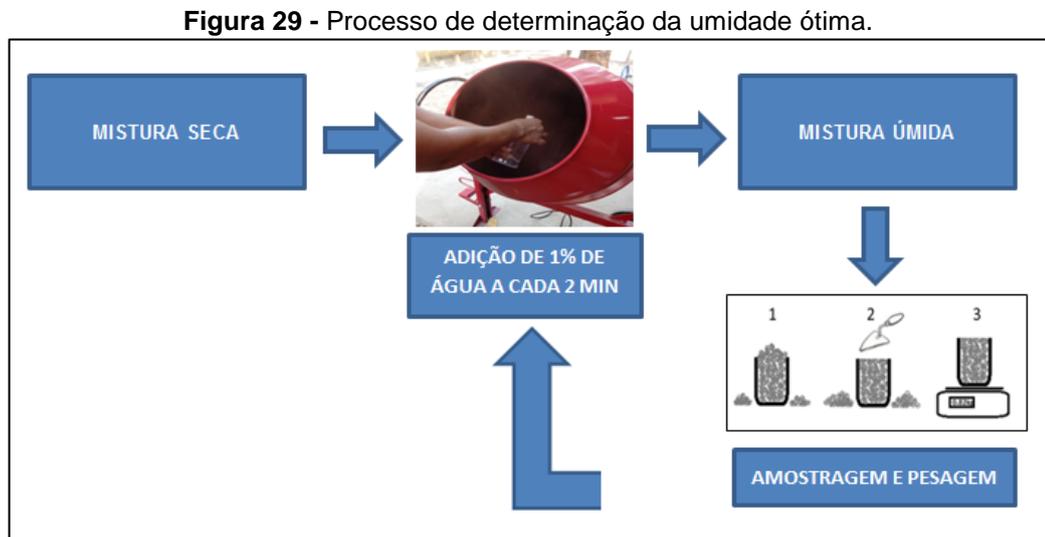


Fonte: Autor

Após a pulverização da água uma amostra era recolhida em um becker e após raspar seu excesso, o becker era pesado e seu conteúdo retornava a betoneira para a continuação do processo. Este processo era repetido 3 vezes a cada percentual de água pulverizado, a fim de eliminar pontos fora da curva ocasionados por vibrações ou compactações do becker.

Repetia-se este processo até encontrar o menor peso do becker, ou seja, o menor ponto da curva ou a menor densidade aparente.

A figura 29 exemplifica todo o processo.



Fonte: Autor

3.2.4. Sinterização

Após o processo de micropelotização as misturas foram inseridas no processo de sinterização, utilizou-se o sinterizador piloto desenvolvido e construído neste mesmo trabalho. E avaliaram-se as condições como temperatura e a movimentação da frente de queima.

Foram utilizados 3 termopares, sendo 2 em diferentes alturas e profundidades do leito e 1 logo abaixo da grelha, no intuito de acompanhar as temperaturas na mistura e a temperatura de saída dos gases.

Antes de inserir a mistura no sinterizador, a grelha foi coberta pelo bedding ou grelha falsa (sinter britado) para proteção e sustentação da mistura à sinterizar.

Em seguida, a mistura foi colocada na panela sobre a grelha falsa e coberta com uma pequena camada de carvão, estando pronta para o início da sinterização, como mostra a figura 30.

Figura 30 - Panela preenchida com mistura à sinterizar



Fonte: Autor

Utilizando o maçarico de GLP foi dada a ignição, após a combustão da camada de carvão, foi acionado o motor exaustor iniciando a transferência de calor para as camadas inferiores. Este processo é visualizado através da figura 31.

Figura 31 - Processo de ignição e queima



Fonte: Autor

A sinterização foi considerada como finalizada quando a temperatura de saída dos gases atingir 90°C, neste momento o exaustor foi desligado.

3.2.5. Rendimento

Após a sinterização, foi realizado o tombamento da panela e retirado 1kg de sinter para o ensaio de tamboreamento, análise química e morfológica.

O restante do material foi classificado em peneira de 6,35mm, o passante foi classificado como finos de retorno. Desta forma o rendimento foi calculado com base nos material acima de 6,35mm.

3.2.6. Teste de tamboreamento

Este teste tem o intuito de determinar a resistência a abrasão do sinter. Na literatura existem normas que padronizam este teste, no entanto, necessita de 20kg de sinter, ou seja, uma quantidade superior que o equipamento piloto pode produzir em uma única batelada. Desta forma foi empregada uma técnica utilizada no trabalho publicado por Telles (2015)^[22], a fim de comparar os resultados gerados em ambos.

Para o teste foi utilizado 1kg de sinter e um moinho de bolas (sem as bolas) com 60% de sua capacidade de rotação, ficando assim bem próximo da velocidade utilizada na betoneira. Após 200 voltas o material foi classificado na peneira de 6,35mm e o resultado expresso com base na porcentagem de material retido.

3.2.7. Caracterização química e morfológica do sinter

A composição química e a estrutura morfológica do sinter refletem diretamente em sua qualidade, tentou-se identificar estas características.

O sinter foi caracterizado usando o microscópio óptico e o microscópio eletrônico de varredura (MEV), e na análise química foi utilizado o espectrômetro de energia dispersiva (EDS), tendo uma análise quantitativa pontual das amostras.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Sinterizador piloto Greenawalt

Ao final de todos os processos de identificação das necessidades e montagem do equipamento, o objetivo de construção foi atingido como podemos ver na figura 32.

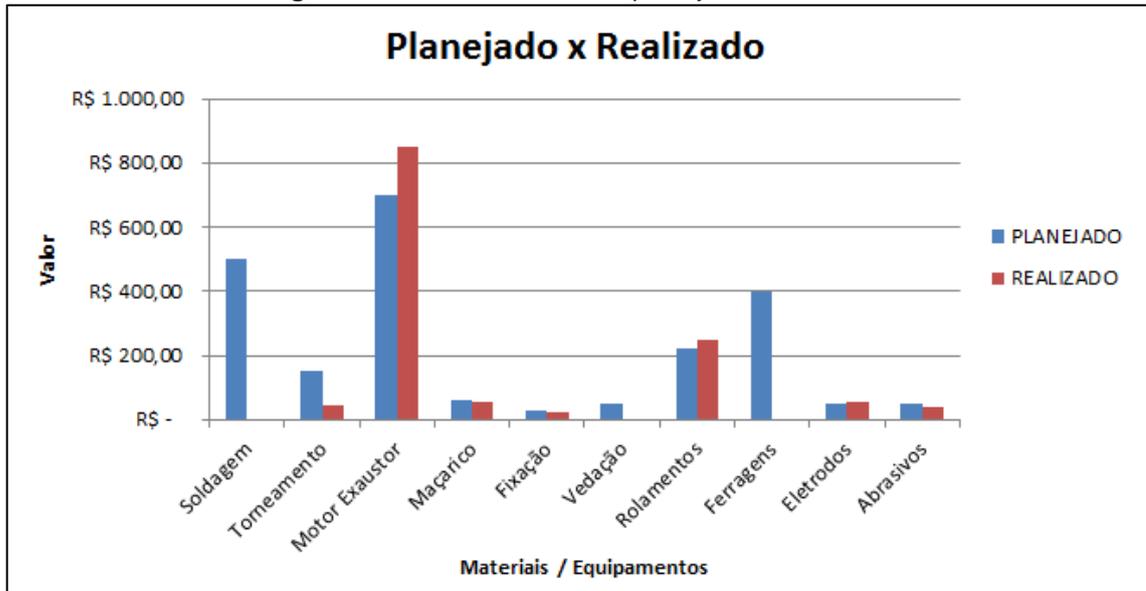
Figura 32 - Sinterizador piloto Greenawalt



Fonte: Autor

Com o término da montagem o equipamento foi transportado para a universidade e acomodado na usina de tratamentos de minérios.

Após a finalização processo de montagem, foi realizada uma análise financeira com foco nas dispersões entre o planejado x realizado do plano orçamentário montado. A figura 33 demonstra esta análise.

Figura 33 - Gráfico de análise planejado x realizado

Fonte: Autor

Notam-se algumas dispersões tanto positivas, quanto negativas em relação ao planejado, no entanto, os itens mais impactantes foram a mão de obra (soldagem e torneamento), vedação e as ferragens. Em relação a mão de obra, está foi realizada inteiramente pelo autor, juntamente com pessoas profissionais que dominam as técnicas e que não cobraram pela mão de obra. Quanto aos materiais como ferragens, estes foram doados por empresas do ramo de reciclagem de aço, desta forma 100% da estrutura de sustentação e até mesmo a panela são materiais reciclados.

Ao final desta análise detectamos uma economia de 40,3% em relação ao planejado.

4.2. Simulação física – Resultados

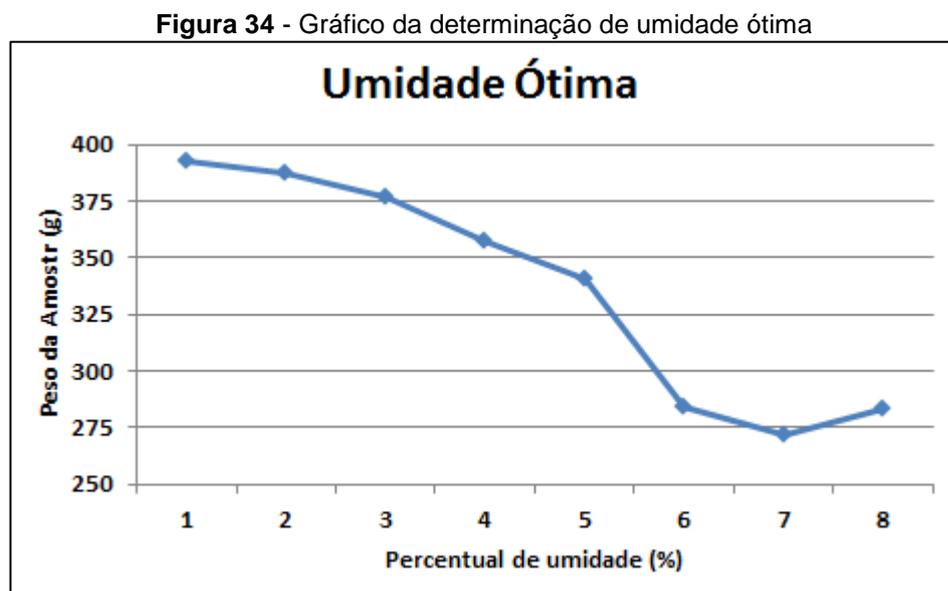
Primeiramente foi realizado um teste do equipamento usando 10 kg da mistura, onde neste momento o objetivo foi testar a funcionalidade do sinterizador, verificando parâmetros como o fluxo de ar (visualmente), movimentação da frente de combustão e as temperaturas atingidas no processo.

Neste teste a principal dificuldade encontrada foi a micropelotização, pois com equipamento utilizado não se conseguiu ter um bom controle de umidade e um ângulo ideal de rotação. Estas dificuldades impactaram diretamente na percolação do ar, nas temperaturas (atingindo 986,2°C) e conseqüentemente a qualidade do sinter produzido.

4.2.1. Umidade ótima

No segundo teste realizado foi utilizado um equipamento adequado, onde se pode ter um bom controle da umidade e ângulo de rotação do material, fazendo com que a aglomeração ocorresse de forma correta e satisfatória.

Os resultados da determinação da umidade ótima podem ser visto na figura 34.



Fonte: Autor

Para minérios, as frações mais grossas necessitam de menos quantidades de água, enquanto os minérios mais finos precisam de uma quantidade maior, o que favorece a micropelotização. ^[6]

No entanto, A variedade de materiais presentes nas misturas e os diversos fatores influenciadores, dificultam a existência de testes confiáveis para a determinação de capacidade de aglomeração de uma determinada mistura. ^[4]

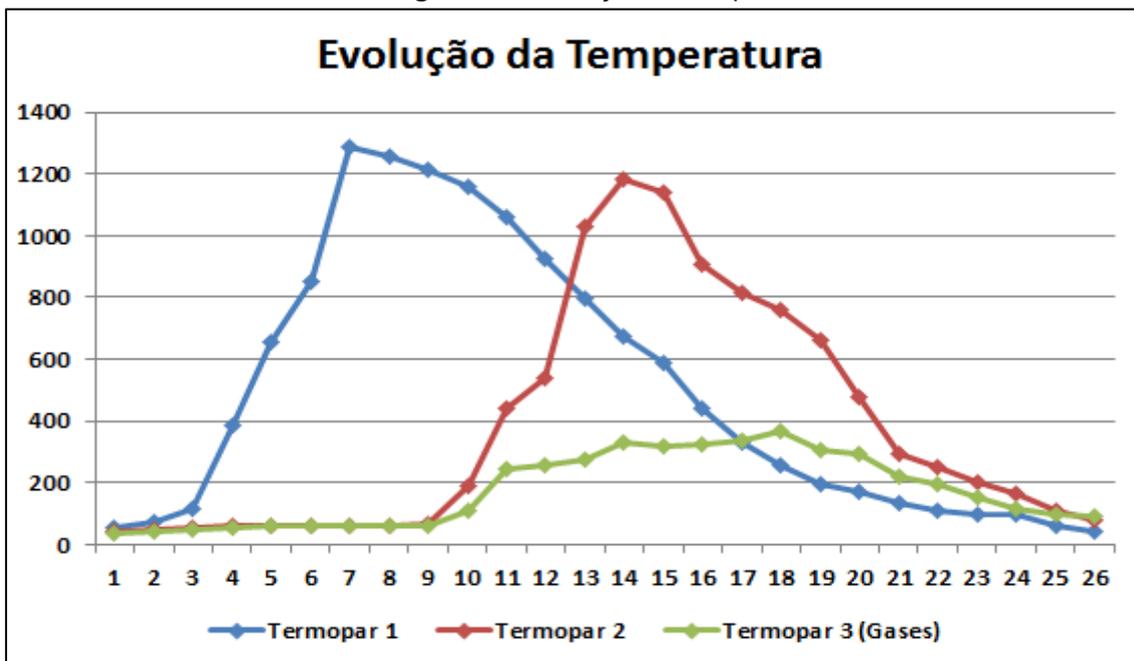
4.2.2. Temperatura

Após um processo de micropelotização com melhores controles, obteve-se como resultado uma aglomeração adequada, houve um impacto direto nas temperaturas atingidas durante a sinterização, o que pode ter possibilitado a formação de novas fases.

As misturas com maior permeabilidade permitem maior vazão de ar no interior da panela de sinterização, aumentando os picos de temperatura e diminuindo o tempo de processo. [22]

Na figura 35 pode-se acompanhar a evolução da temperatura do momento da ignição até o resfriamento do sinter.

Figura 35 - Evolução da temperatura



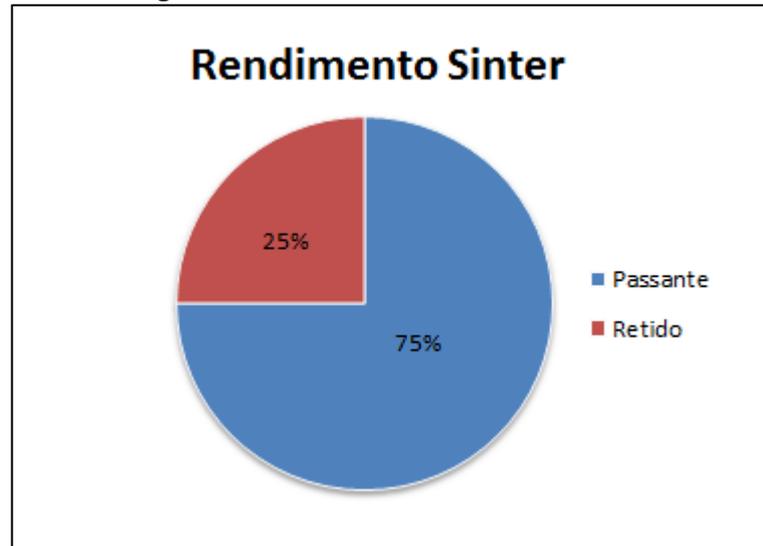
Fonte: Autor

No termopar 1 registrou 1286°C, onde se manteve durante 2 minutos acima de 1200°C, enquanto o termopar 2 registrou 1198°C, onde se manteve acima de 1100°C também por aproximadamente 2 minutos, em ambos os casos tendo um resfriamento lento, como se esperava, assim propiciando a fusão parcial e aglomeração das partículas e o termopar 3 registrou 390°C na saída dos gases.

No caso do termopar 2, este estava localizado em uma área mais próxima da parede da panela e da grelha falsa, locais onde há maior troca (perda) de calor com o meio.

4.3. Rendimento da sinterização

A Figura 36 mostra o rendimento do bolo de sinter, ou seja, a relação entre o passante e o retido em 6,35mm, em percentual.

Figura 36 - Gráfico de rendimento do sinter

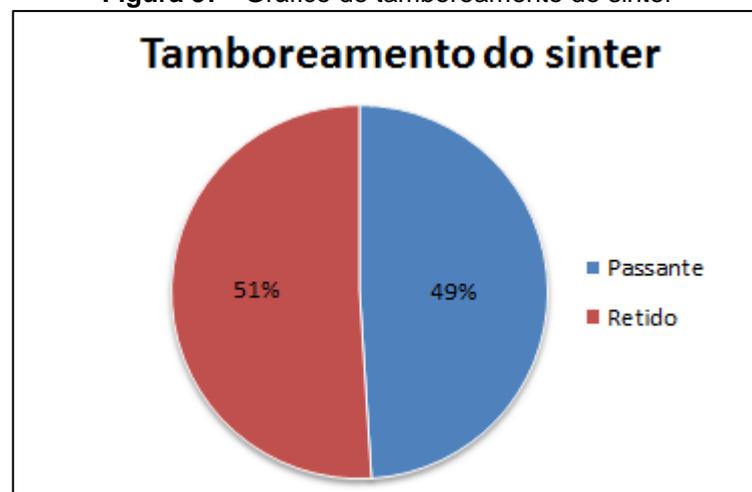
Fonte: Autor

Com um rendimento de 25%, tivemos um resultado bastante aproximado com o obtido no experimento realizado por Telles (2015) [22], que foi de 29% utilizando como combustível 100% de carvão vegetal.

Em geral, nos equipamentos de escala laboratorial, a rendimento é de 10 a 15% menor comparada a obtida na indústria. Isso devido à relação em as áreas de superfície e a capacidade do sinterizador. [4]

4.4. Tamboreamento do sinter

A figura 37 mostra o resultado obtido no teste de tamboreamento do sinter, ou seja, a relação entre o passante e o retido em 6,35mm, em percentual.

Figura 37 - Gráfico de tamboreamento do sinter

Fonte: Autor

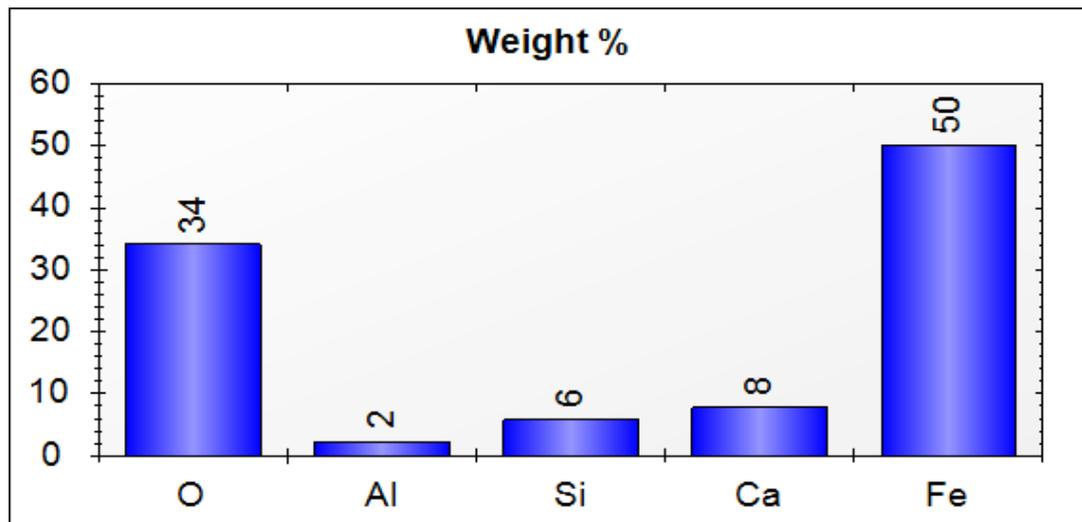
O combustível utilizado (carvão vegetal) impactou diretamente na resistência do sinter produzido. No experimento realizado por Telles (2015) [22], os resultados para este teste atingiram 90%, quando utilizado coque como combustível.

Combustíveis que possuem reatividades maiores que a do coque tende a diminuir a resistência do sinter. [14]

4.5. Análise química do sinter

Foi realizada a análise quantitativa através do EDS, onde devido à heterogeneidade do sinter foram feitas 10 amostragens (spectrum) ao longo do material, na qual se identificou um valor médio dos resultados apresentados, conforme podemos ver na figura 38.

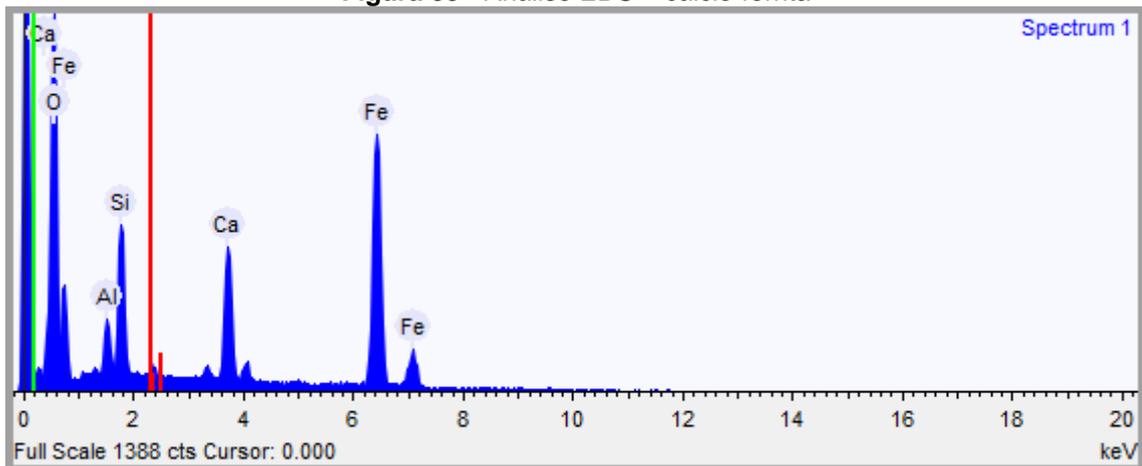
Figura 38 – Resultado médio quantitativo do EDS



Fonte: Autor

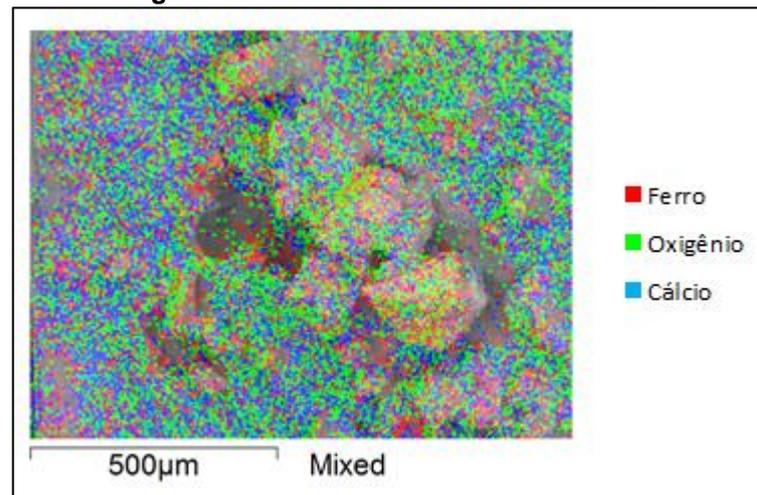
O percentual de ferro encontrado foi de 50% na região analisada, sendo um resultado satisfatório, tendo em vista o sinter feed utilizado e segundo Telles (2015) [22], devido à heterogeneidade do sinter a proporção dos elementos podem variar dependendo região de análise. Sendo também um bom resultado em comparação aos dados apresentados por Oliveira (2009), de uma planta industrial localizada no município de Marabá, que foi de 58% de ferro, utilizando sinter feed de origem idêntica aos utilizados neste trabalho.

Na figura 39 pode-se verificar a forte presença dos elementos Fe, Ca, Si, e O, sendo estes formadores de silicatos e calcio-ferrita, o que demonstra a eficiência no processo de fusão das partículas.

Figura 39 - Análise EDS – cálcio-ferrita

Fonte: Autor

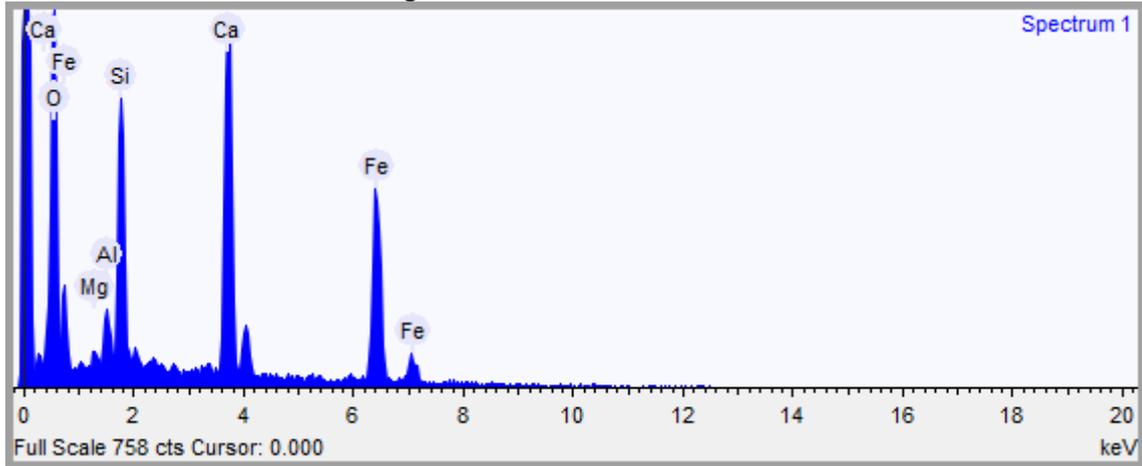
Na figura 40 é possível notar homogeneidade (nesta região) dos elementos citados anteriormente.

Figura 40 - Elementos marcados com cores

Fonte: Autor

A calcio-ferrita é importante, pois apresenta boa taxa de redução, boa resistência física e bom índice de degradação sob-redução (RDI).^[4]

Em alguns pontos as calcio-ferritas estão ligadas a grandes matrizes cristalizadas de SiO_2 e Al_2O_3 , nestes casos normalmente são chamadas de silico-ferrita de cálcio e alumina (SFCA)^[22]. Esta condição fica evidenciada na figura 41 onde foram encontrados picos maiores de sílica e alumina.

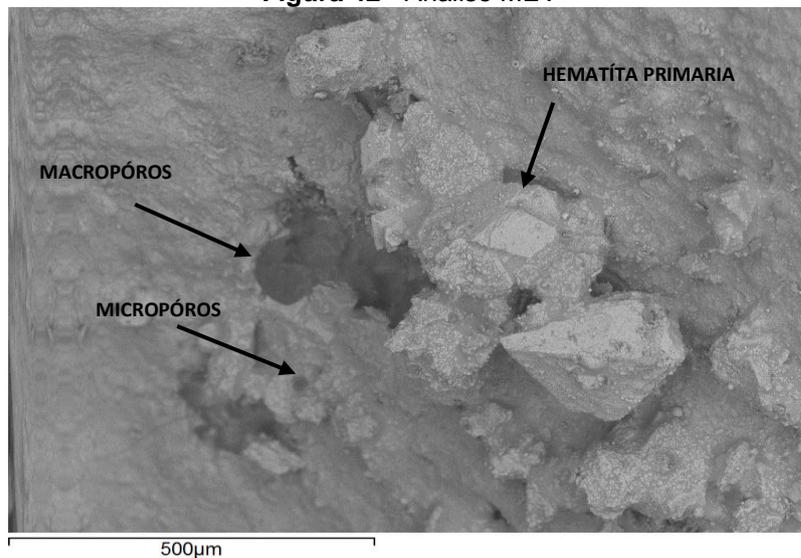
Figura 41 - Análise EDS – SFCA

Fonte: Autor

As silico-ferrita de cálcio e alumina possuem maiores redutibilidade quanto são formadas em temperatura próximas de 1100°C.^[18] Lembrando que temperaturas próximas a esta foram registradas pelo termopar 2 em locais próximos a parede da panela de sinterização.

4.6. Análise morfológica do sinter

Para realizar esta análise utilizamos o microscópio eletrônico de varredura (MEV) e o microscópio óptico, onde foi possível verificar micros e macros poros e grãos de hematita cobertos por uma matriz de silicatos, conforme citadas anteriormente. A figura 42 nos dará maior compreensão.

Figura 42 - Análise MEV

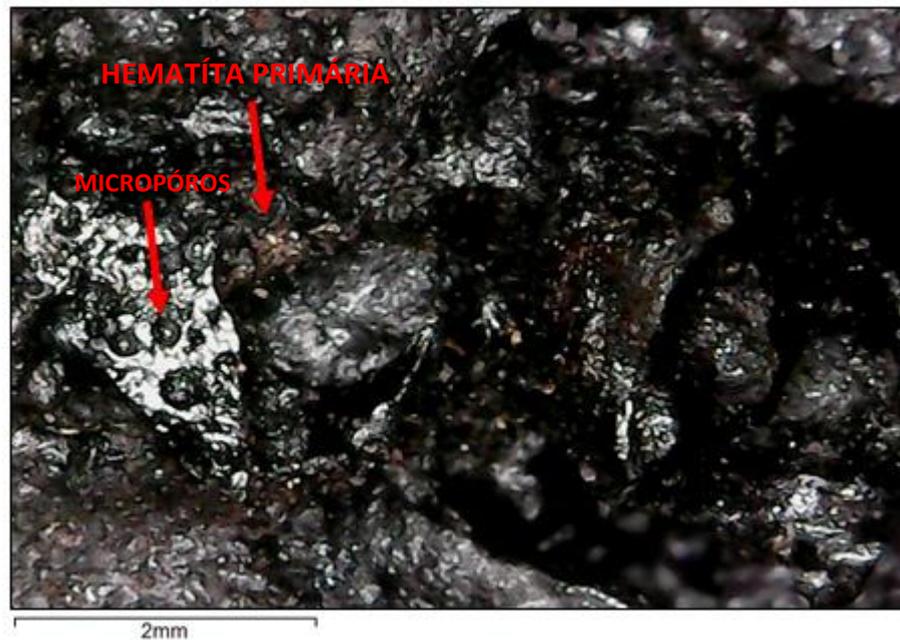
Fonte: Autor

A porosidade é um parâmetro importante no processo de sinterização de minério de ferro, principalmente por sua influencia direta na redutibilidade e resistência, segundo Bhagat (2006) ^[24], a formação de micro poros é o principal influenciador no aumento do índice de redutibilidade (RI) do sinter.

No ensaio de redução interrompida realizado por Telles (2015) ^[22] em seu experimento, fica evidenciado que os poros são os pontos preferencias das reações de redução.

As porosidades juntamente com a presença de hematita primária também podem ser constatadas através das imagens do microscópio óptico, conforme figuras 43 e 44.

Figura 43 - Presença de micro poros e hematita primária



Fonte: Autor

Na figura 44 é possível observar com nitidez um grande grão de hematita primária parcialmente fundida.

Figura 44 - Grão de hematita primária



Fonte: Autor

Quando a temperatura de sinterização não ultrapassa a 1300°, são encontradas hematitas primárias, onde estas por sua vez tende a possuir maior Índice de redutibilidade (RI), devido suas porosidades intrínsecas ^[15].

Assim atendendo uma das exigências do alto forno e contribuindo para um bom desempenho do sinter em sua aplicação.

5. CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

- O desempenho do sinterizador piloto atingiu as expectativas, proporcionando um bom fluxo de ar ao processo e atingindo temperaturas de sinterização;
- Uma qualidade da micropelotização gera um impacto direto no processo de sinterização, comprometendo a evolução da temperatura;
- Em equipamentos pilotos o rendimento do sinter sempre será menor que a escala industrial, devido à razão entre a capacidade e a superfície, propiciando uma alta taxa de troca de calor com o ambiente;
- A troca de calor nas regiões periféricas da panela impacta diretamente na qualidade do sinter produzido, devido às fases geradas, a exemplo da SFCA.
- A escolha do combustível utilizado impacta diretamente na resistência do sinter, devido sua alta reatividade.
- O teor de ferro contido no sinter produzido atendeu as expectativas, visto a qualidade do sinter feed e atendendo até mesmo padrões industriais.
- Foi possível construir um equipamento totalmente funcional, onde 80% das peças aplicadas são oriundas da sucata;
- Que através deste equipamento poderão surgir novos trabalhos e pesquisas relacionadas à sinterização.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A partir da doação deste equipamento para a universidade, abrem-se portas para novos trabalhos, como:

- Reaproveitamento de resíduo siderúrgico via processo de sinterização;
- Simulação computacional dos fenômenos do processo.
- Substituição de carvão vegetal por outros combustíveis, com exemplo coque;

Além de novas pesquisas, este equipamento poderá auxiliar em aulas práticas no decorrer do curso de engenharia de materiais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NAJAR, F.J; SANTOS, J.F. Curso de Sinterização. USIMINAS, Ipatinga, M.G,Brasil, p. 32-66,1981.
- [2] BALL, D.F et al. Agglomeration of ore. Heinemann Educational Books Likited Lodon, 1973.
- [3] ARAUJO, L. A. Manual de Siderurgia. Editora arte e Ciência. V 1 , 1997.
- [4] TAKANO, C. Estudo da influência de alguns combustíveis na sinterização de minério de ferro. 1970. 110p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1970. P. 13, 14, 29-33.
- [5] HINKLEY, J et al. an Investigation of Pre-ignition Air Flow in Ferrous Sintering International Journal of Mineral Processing. v 42, pp 37-52, 1994
- [6] HONORATO, E.P. Adequação granulométrica das matérias-primas e do sistema de segregação contínua (I.S.F), para melhorias na produtividade e qualidade do sinter para os altos-fornos. 2005. 114p. Dissertação (Mestrado). Engenharia Metalúrgica e de Minas na Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2005. p. 6,7, 9-11, 15,16,18, 21, 22.
- [7] ISHIKAWA, Y. Recent progress in the sintering technology – high reducibility and improvement of fuel consumption. Ironmaking Conference Proceedings, AIME, v. 41, p. 80-89, 1982.
- [8] 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, Escola de Minas de Ouro Preto, 56(2), 97-102,2003.
- [9] MOURÃO, M.B. Introdução a siderurgia. São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2007, 428p.
- [10] LU, L; HOLMES, R.J; MANUEL, J.R. Effects of alumina on sintering performance of hematite iron ores. ISIJ INTERNATIONAL, v. 47, n 3, p. 349-358, 2007.
- [11] 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, v. 35, n. 8, p. 567-574, 2008.
- [12] OOI, T. C. The effect the charcoal combustion on iron-ore sintering performance and emission of persistente organic pollutants. Combustion and Flame. n 158, p. 979-987, 2011.
- [13] LOPES, M. V. Caracterização do sinter para uso em altos-fornos a carvão vegetal. 2012. 80p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Eng. de Materiais, Itajubá, 2012, p. 14-25.
- [14] LOVEL, R. The influence of fuel reactivity on iron ore sinter. ISIJ INTERNATIONAL. V. 49, n. 2, p. 195-202, 2009.
- [15] MUKHERJEE, T. Structure of fluxed sinter. Iron and steel making. v. 12, no. 4, p. 151-155, 1985.

- [16] OYAMA, N.; SATO, H.; TAKEDA, T. – Development of Coating Granulation Sintering Process for Improving Productivity and Reducibility. The 5th European Coke and Ironmaking Congress, Stockholm – Swiden – Second Volumew, Tu 9: 1-16, june 2005
- [17] LITSTER, J.D. E .WATERS, A.G. Influence of the Material Properties of Iron Ore Sinter Feed on Granulation Effectiveness. Powder Technology. v 55, pp 141-151, 1988.
- [18] STARLING, A. R. A. Avaliação de metodologias de simulação física do processo de sinterização, 2012, 162p, Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica Materiais e de Minas, Belo Horizonte, 2012, p. 45.
- [19] XUEWEI, L.V et al. Kinetics of Water Absorption by the Bed of Iron Ore Particle During Granulation. Powder Technology. v 204. p 138-144, 2010.
- [20] CASTRO, L.F.A et al. Princípios Básicos e Processos de Fabricação do Gusa ao Aço Líquido. Belo Horizonte, p 25-31, 1985.
- [21] OLEVSKY, E. A. Theory of Sintering: from Discrete to Continuum. Materials Science and Engineering. p 41–100, 1998.
- [22] TELLES, V.B. Estudo da influencia da sinterização de minérios de ferro na redução por hidrogênio. 2015. 126p. Tese (Doutorado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015, p. 40, 41, 43, 46, 65, 74.
- [23] OLIVEIRA, S.S. Estudo preliminar do uso de finos de topo na formulação de sinter para alto forno, Universidade Federal do Pará, Marabá, 2009, p. 39.
- [24] BHAGAT, R.P. Porosity of sinter its relation with the sintering índices. ISIJ INTERNATIONAL, v. 46, n. 11, p.1728-1730, 2006.