



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

LOURIVAL MIQUÉIAS DE ARAÚJO MEIRELES

**SINTERIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO UTILIZANDO CARVÃO VEGETAL  
COMO COMBUSTÍVEL**

ANANINDEUA  
2018

LOURIVAL MIQUÉIAS DE ARAÚJO MEIRELES

**SINTERIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO UTILIZANDO CARVÃO VEGETAL  
COMO COMBUSTÍVEL**

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. Ms. Alacid do Socorro S. Neves.

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

LOURIVAL MIQUÉIAS DE ARAÚJO MEIRELES

**SINTERIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO UTILIZANDO CARVÃO VEGETAL  
COMO COMBUSTÍVEL**

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

---

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

---

Prof. Ms. Diego Hildebrando dos Santos  
(Faculdade da Amazônia - FAAM – Ananindeua – Membro Convidado)

---

Bel. Brenda Thayssa Figueira Daniel  
(PPGEM / ITEC – UFPA - Campus Belém – Membro Convidado)

ANANINDEUA  
2018

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois Ele me deu força e saúde para prosseguir na graduação mesmo com as dificuldades existentes e por eu ter alcançado essa vitória e concluir minha primeira graduação.

A toda a minha família pelo apoio, especialmente os meus pais, Neusa Arlete e Lourival Demétrio, sempre me incentivaram e me ajudaram mesmo com todas as dificuldades me proporcionaram uma educação de boa qualidade desde a infância para que hoje eu pudesse conquistar meus sonhos, e as minhas irmãs.

A cada amigo que conquistei durante o curso que me ajudaram e adquirimos conhecimentos juntos, principalmente a Brenda Daniel e a Dayana Rossy, que se mostraram parceiras e depuseram seus tempos e conhecimentos para me ajudar neste trabalho, sempre estando ao meu lado.

Ao corpo docente da Faculdade de Ciência e Tecnologia.

Ao meu Orientador Professor Me. Alacid Neves e Coorientador Professor Dr. Daniel Sousa, por dedicarem seus tempos para me ensinar, tanto em sala de aula nos conhecimentos acadêmicos e profissionais como durante a formação deste trabalho, pois eu levarei a por toda minha vida cada conselho e aprendizagem, agradeço de coração aos dois.

Também agradeço ao Secretário Josivan Franca, pois demonstrou ser um grande amigo, não apenas profissionalmente como no pessoal, sempre me ajudando quando preciso.

A Empresa SINOBRAS pelo fornecimento das amostras para realização deste trabalho.

Por fim, a todas as pessoas, como colegas de curso, amigos da vida social, irmãos em fé da igreja, que contribuíram de forma direta ou indiretamente para o meu desenvolvimento e aprendizagem e na realização deste trabalho.

## RESUMO

Para os processos siderúrgicos, geralmente o combustível usado é o coque proveniente do carvão mineral, obtido através da coqueificação. Porém, este trabalho busca a inserção dos finos do carvão vegetal, produto da queima do eucalipto proveniente de resíduos do processo siderúrgico. O carvão vegetal contribui na produção de 42% do aço brasileiro. A moinha possui um alto poder calorífico, que ajuda na queima e na aglomeração de finos. Nesta aglomeração é imprescindível que hajam insumos que visem um melhor aglomerado, com boa resistência mecânica e que seja de boa qualidade para posteriores operações e fins. A adição da moinha de carvão vegetal aumenta a reatividade e a produtividade, importante ressaltar que este combustível é renovável, uma biomassa. Gases liberados pelo carvão vegetal interferem na aglomeração em estudo, a sinterização, que se apresenta como a melhor opção para aglomerar os finos de minério de ferro. O sinter, formado com adição de moinha de carvão vegetal, é um composto dúctil e demonstra boa resistência, propriedade mecânica analisada após ensaios mecânicos. A moinha de carvão vegetal implica na porosidade e é indiretamente proporcional a resistência; portanto, não é vantajoso um sinter com alto grau de poros, pois irá deixá-lo menos resistente.

**Palavras-chave:** Moinha de carvão vegetal. Aglomeração. Sinterização. Siderurgia.

## **ABSTRACT**

For steelmaking processes, usually the coke used is coke from coal, obtained through coking. However, this work seeks the insertion of charcoal fines, the product of wood burning. Charcoal contributes to the production of 42% of Brazilian steel. The mill has a high calorific value, which helps in the burning and agglomeration of fines. In this agglomeration it is imperative that there is an input that aims at better agglomerate, with good mechanical resistance and that is of good quality for later operations and ends. The addition of charcoal grinder increases reactivity and productivity, important to note that this renewable fuel is a biomass. Few gases released by it do not interfere in the agglomeration under study, the sintering that is presented as the best option to agglomerate iron ore fines. The sinter, formed with addition of charcoal mill, is a ductile compound and shows good resistance, mechanical property analyzed after mechanical tests. Charcoal implies in the porosity with which the resistance is indirectly proportional; therefore, a sinter with a high degree of pore is not advantageous, as it will render it less resistant.

**Keywords** : Charcoal. Agglomeration. Sintering. Steel Industry.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- FLUXO ESQUEMÁTICO DO PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO.....	11
FIGURA 2 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO. ....	14
FIGURA 3 – FLUXOGRAMA DA OBTENÇÃO DO CARVÃO VEGETAL .....	15
FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DE INFLUÊNCIA DO CARVÃO VEGETAL .....	16
FIGURA 5 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE SINTERIZAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO.....	19
FIGURA 6 – FLUXOGRAMA DOS PROCESSOS DE SINTERIZAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO .....	21
FIGURA 7 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA.....	25
FIGURA 8- MATÉRIAS PRIMAS: FCC, FMF E MCV, RESPECTIVAMENTE.....	26
FIGURA 9 - COMPOSIÇÃO DE 1KG PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE ÓTIMA:(A) PULVERIZANDO A COMPOSIÇÃO, (B) MATERIAL MICROPELOTIZADO. ....	26
FIGURA 10 – MICROPELOTIZAÇÃO (COMPOSIÇÃO INSERIDA NA BETONEIRA).....	30
FIGURA 11 - ANEMÔMETRO. ....	30
FIGURA 12 - EQUIPAMENTOS PARA O PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO. A) TERMOPARES INSERIDOS NO REATOR VERTICAL DE LEITO FIXO; B) O PAPERLESS RECORDER DO TIPO PHL. ....	31
FIGURA 13 - EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA DA SINTERIZAÇÃO COM 15% DE MCV.....	34
FIGURA 14 - EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA DA SINTERIZAÇÃO COM 20% DE MCV.....	34
FIGURA 15 - SÍNTER. ....	35
FIGURA 16 - EDS DA AMOSTRA DE SÍNTER COM 15% DE MCV. ....	36
FIGURA 17 - EDS DA AMOSTRA DE SÍNTER COM 20% DE MCV. ....	36
FIGURA 18 - MORFOLOGIA DO SÍNTER COM 15% DE MCV ANALISADO ATRAVÉS DO MEV. (37A) – MEV 150X DE EXPANSÃO; B) MEV 800X DE EXPANSÃO.....	37
FIGURA 19 - MORFOLOGIA DO SÍNTER COM 20% DE MCV ANALISADO ATRAVÉS DO MEV. A) MEV 100X DE EXPANSÃO; B) MEV 800X DE EXPANSÃO.....	37
FIGURA 20 - DRX DO SÍNTER COM 15% DE MCV.....	38
FIGURA 21 - DRX DO SÍNTER COM 20% DE MCV.....	39
FIGURA 22 - PESAGEM DO SÍNTER A 1 KG. ....	41
FIGURA 23 - EQUIPAMENTOS PARA O PROCESSO DE TAMBOREAMENTO. A) PENEIRA DE 6,3 MM. B) MICROPELOTIZADOR. ....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção bruta nacional do minério de ferro.....	15
Tabela 2 - Características do sinter.....	24
Tabela 3 - Composição do leito com 15% de MCV.....	29
Tabela 4 - Composição do leito com 20% de MCV .....	29
Tabela 5 - Determinação da umidade ótima e massa específica aparente. ....	33
Tabela 6 - FRX do sinter com 15% de MCV.....	39
Tabela 7 - FRX do sinter com 20% de MCV.....	40
Tabela 8 - Índice de tamboreamento dos sinteres.....	41

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** – Alumina;

**CaCO** – Carbonato de cálcio (calcário calcítico);

**CaO** – Óxido de Cálcio (cal);

**CO** - Monóxido de carbono;

**CO<sub>2</sub>**- Dióxido de carbono ou gás carbônico;

**DRX** – Difração de Raios X;

**EDS** – Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X;

**FeO**– Óxido de ferro, wusita;

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**–Hematita;

**Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>** – Magnetita;

**FCC** – Finos de Calcário Calcítico;

**FMF** - Finos de Minério de Ferro;

**FRX** - Espectrometria de fluorescência de raios X;

**MCV** – Moinha de Carvão Vegetal;

**MEV** - Microscópio Eletrônico de Varredura;

**MgO** – Óxido de Magnésio;

**P** – Fósforo;

**SiO<sub>2</sub>** – Óxido de Silício (sílica).

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 OBJETIVOS.....</b>	<b>12</b>
1.1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos .....	12
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Matérias-primas do Processo de Aglomeração .....</b>	<b>13</b>
2.1.1 Finos de Minério de Ferro (FMF) .....	13
2.1.2 Moinha de Carvão Vegetal (MCV) .....	15
2.1.3 Fino de Calcário Calcítico (FCC) .....	17
<b>2.2 Processo de Aglomeração.....</b>	<b>17</b>
2.2.1 Briquetagem.....	18
2.2.2 Pelotização .....	18
2.2.3 Sinterização.....	19
<b>2.4 Sínter .....</b>	<b>23</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Materiais.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2 Métodos .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.1 Determinação do teor de umidade ótima.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.2 Condições para o Processo de Sinterização .....</b>	<b>27</b>
3.2.2.1 Procedimentos para a produção de formação do sínter .....	27
3.2.2.2 Montagem do equipamento .....	27
<b>3.2.3 Composição do leito de sinterização .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2.4 Micropelotização .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.5 Sinterização .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.6 Caracterização do Sínter.....</b>	<b>31</b>
3.2.6.1 Caracterização físico-química e morfológica .....	31
3.2.6.2 Simulação Física do Processo de Sinterização - Teste de tamboreamento .....	32
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>33</b>
<b>4.1 Teor de Umidade ótima.....</b>	<b>33</b>
<b>4.2 Sinterização .....</b>	<b>34</b>

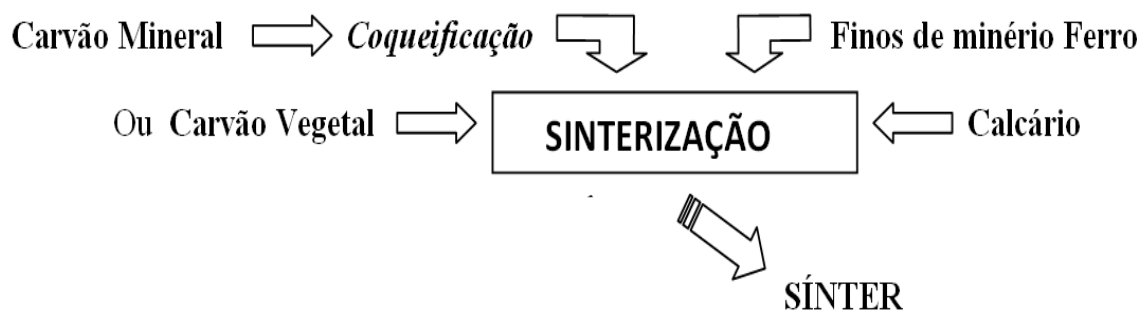
<b>4.2.1 Evolução da Temperatura.....</b>	<b>34</b>
<b>4.2.2 Sínter.....</b>	<b>35</b>
<b>4.3 Caracterização do sínter .....</b>	<b>35</b>
<b>4.3.1 Análise físico-química e morfológica .....</b>	<b>35</b>
4.3.1.1 EDS.....	35
4.3.1.2 MEV .....	37
4.3.1.3 DRX.....	38
4.3.1.4 FRX .....	39
<b>4.3.2 Análise de Resistência à abrasão, através do ensaio de tamboreamento dos sínteres .....</b>	<b>40</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>43</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>44</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>45</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No processo de aglomeração é necessário que se tenha uma faixa de granulometria adequada, de tal modo que a aglomeração seja eficiente. Um dos processos de aglomeração é a sinterização.

Na sinterização, o processo estudado neste trabalho, obtém-se um produto com alta área superficial e resistência mecânica adequada por meio da aglomeração dos finos (TELLES, 2015). Este produto é inserido em processos siderúrgicos posteriores. A resistência é determinada pela quantidade e granulometria do combustível que é adicionado ao processo, em termos mais específicos o carvão vegetal, o qual possui características e propriedades favoráveis à sinterização, comparando-o com o coque que é outro combustível usado no processo, mas que possui baixa rentabilidade, pois libera gases na queima que podem prejudicar o produto final. A Figura 1 apresenta o esquema do processo de sinterização.

**Figura 1-** Fluxo esquemático do processo de sinterização.



**Fonte** - Elaborado pelo autor (2018).

A escolha do carvão vegetal para este trabalho foi devido o seu teor de carbono fixo, devido ser retirado de fazendas de produção legalizadas e ser um resíduo oriundo do processo siderúrgico. O uso da moinha de carvão vegetal foi realizado após determinar seu alto potencial de combustão e no caso de uma aglomeração em reator de leito fixo, têm-se estudos em que esse material foi utilizado e apresentou ser mais viável, pois é produto da carbonização da madeira (ASSIS, 2008). Este é proveniente de uma siderúrgica da cidade de Marabá-PA, SINOBRAS.

Na produção do carvão vegetal, é gerada uma quantidade excessiva de finos, os quais são considerados descartáveis e assim descartados no meio ambiente, então levando isso em

consideração, como forma de diminuir a degradação e poluição, estes finos foram inseridos no processo de aglomeração.

Adicionando o combustível, carvão vegetal, mais o fundente, calcário, e mais os finos de minério de ferro, estes compostos juntos formam uma mistura heterogênea e que em alta temperatura no estágio da sinterização gera o sinter, composto aglomerado, homogêneo, poroso e dúctil.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Analisar o parâmetro entre 15% e 20% da utilização da moinha de carvão vegetal no processo de aglomeração através da sinterização de finos de minério de ferro.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Realizar a caracterização físico-química e de resistência do sinter produzido a carvão vegetal, com 15% e 20% de teor de moinha de carvão vegetal.
- Avaliar a temperatura de sinterização, considerando o percentual de moinha de carvão dos sínteres produzidos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Matérias-primas do Processo de Aglomeração

#### 2.1.1 Finos de Minério de Ferro (FMF)

Os principais minerais minérios são  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}/\text{OH}$ ,  $\text{FeCO}_3$  e  $\text{FeS}_2$ , respectivamente a magnetita, hematita, goethita, siderita e pirita (DNPM, 2016). De acordo com o DNPM (1986); Chemale e Takehara (2013) as jazidas de ferro possuem uma ampla distribuição e ocorrem em quatro categorias: depósitos sedimentares acamados (formação ferrífera bandada – BIF), depósitos relacionados a atividades magmáticas (vulcano sedimentar), depósitos formados por soluções hidrotermais e depósitos resultantes de alteração e acúmulo em superfície.

Os depósitos de formação ferrífera bandada (BIF) são os de maior importância. No Brasil denominam-se itabiritos; e encontra-se nas reservas do quadrilátero ferrífero-MG, 65% de ferro; serra dos Carajás-PA, 30% de ferro; e Urucum-MS, 4% de ferro (DNPM, 1986).

De plena importância para região norte, o depósito de ferro de Carajás situa-se no sul do Pará, entre os municípios de Marabá e São Felix do Xingu. Este extrai um grande percentual em volume de mineral ferrífero, geralmente associado ao manganês (ARAÚJO, 2005).

Para Chemale e Takehara (2013), a classificação do minério de ferro depende do profissional que o analisa. Para os siderúrgicos é de acordo com a granulometria e propriedade química, esta granulometria é dividida em três grandes grupos: granulados ou bitolados, *sinter feed* e *pellet feed*. Para os mineradores, é de acordo com o tipo de tratamento e beneficiamento, relacionados à friabilidade do minério e ao teor médio de ferro. Para os geólogos, caracteriza-se o minério de ferro associado ao corpo de minério com sua gênese, por meio de sua composição mineralógica e suas microestruturas.

O minério de ferro de boa qualidade como carga dos altos fornos, tem a sua granulometria adequada entre 12 e 25 mm e sua composição em Fe de 65 - 68%;  $\text{SiO}_2$  de 1,5 - 2,5%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de 1,0 - 2,0% e  $\text{P} < 0,1\%$  (ARAÚJO, 2005).

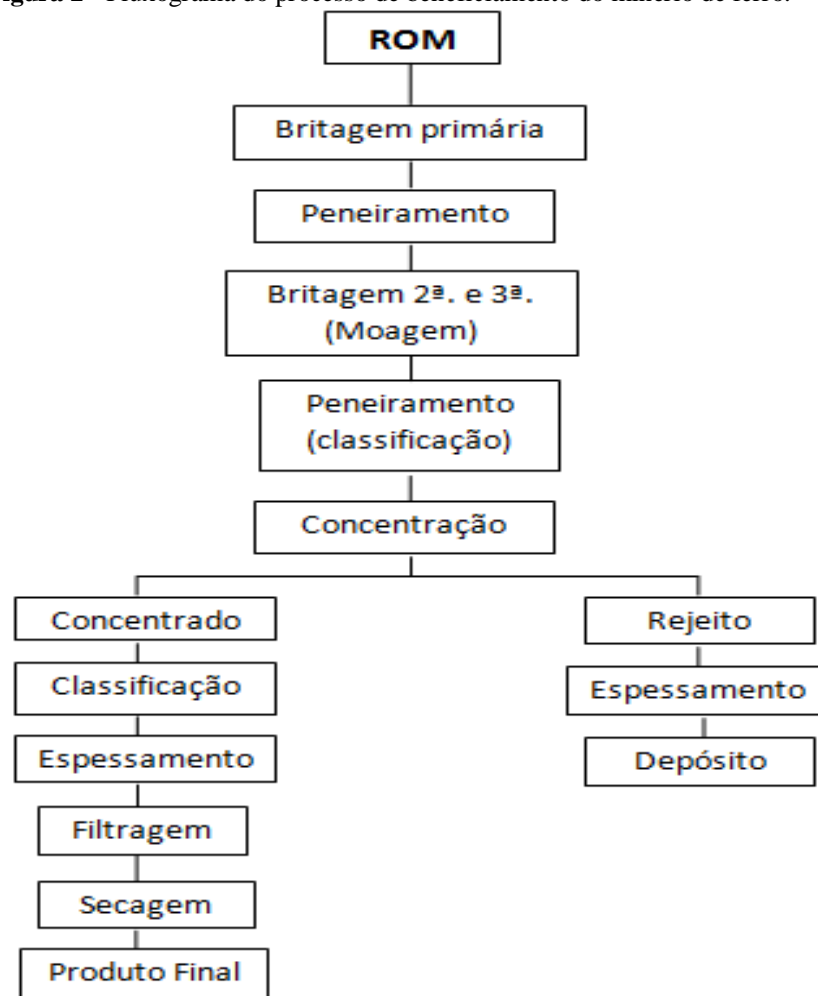
A cristalização do minério de ferro depende do equilíbrio do ambiente e do tempo. O grau de recristalização está condicionado ao grau de oxidação e ao metamorfismo, associado à deformação, envolvendo processos físicos e químicos (CHEMALE; TAKEHARA, 2013).

De acordo com DNPM (1986), no Brasil a predominância é da hematita, porém no Quadrilátero Ferrífero (QF) observam-se variâncias de cristalização e gerações de hematita e dentre outros minerais de ferro. Em Carajás, predomina a hematita microcristalina e em Urucum, ocorre somente à hematita criptocristalina.

Chemale e Takehara (2013) citam que para a siderurgia, o minério de ferro precisa passar por um processo de beneficiamento desde o minério bruto, *Run-of-mine* (ROM).

A Figura 2 apresenta um fluxograma esquematizado das etapas do processo de beneficiamento do minério de ferro.

**Figura 2** - Fluxograma do processo de beneficiamento do minério de ferro.



Fonte - Adaptado de Chemale e Takehara, (2013).

A Tabela 1 representa a produção bruta de ROM em toneladas nos estados brasileiros de maior importância na extração e reserva de minério de ferro.

**Tabela 1** - Produção bruta nacional do minério de ferro.

<b>Substância</b>	<b>Quantidade (ROM)</b>	<b>Contido</b>	<b>Teor Médio</b>
Ferro	595.606.203 t	325.428.734 t	54,64 % Fe
<b>Estados</b>	<b>Quantidade (ROM)</b>	<b>Contido</b>	<b>Teor Médio</b>
<b>Minas Gerais</b>	440.563.389 t	227.746.258 t	51,69 % Fe
<b>Pará</b>	140.948.874 t	91.748.643 t	65,11 % Fe
<b>Mato Grosso do Sul</b>	8.581.928 t	5.248.338 t	61,16 % Fe

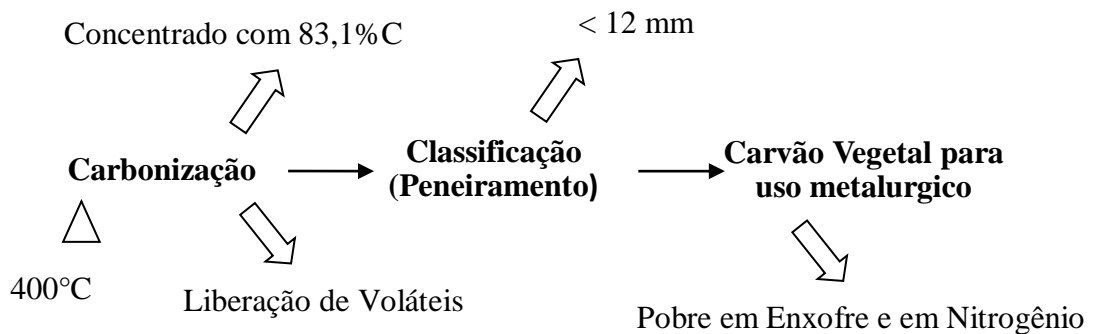
Fonte - DNPM - Anuário Mineral Brasileiro, (2016).

### 2.1.2 Moinha de Carvão Vegetal (MCV)

Os finos de carvão são resultado da produção do carvão vegetal após a queima ou carbonização da madeira em ausência de ar (BARBIERI, 2013). A madeira é composta, de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, água e sais minerais (ASSIS, 2008). O processo origina como rejeito grandes quantidades de finos que são descartados, esta madeira é proveniente de sítios e fazendas onde o plantio de árvores é destinado à produção do carvão vegetal legalizado.

A madeira quando submetida a temperaturas elevadas é transformada em carvão vegetal, pelo processo de carbonização, onde o oxigênio é controlado, e esta transformação libera os componentes voláteis, como água, líquidos orgânicos e gases não-condensáveis (ASSIS, 2008). Para Assis (2008), a carbonização ocorre a 400°C e consiste em concentrar 83,1% de carbono, e o rendimento em carvão é de 34,5%.

A figura 3 a seguir representa as etapas da produção do carvão vegetal.

**Figura 3** – Fluxograma da obtenção do carvão vegetal

Fonte – Elaborado pelo autor (2018)

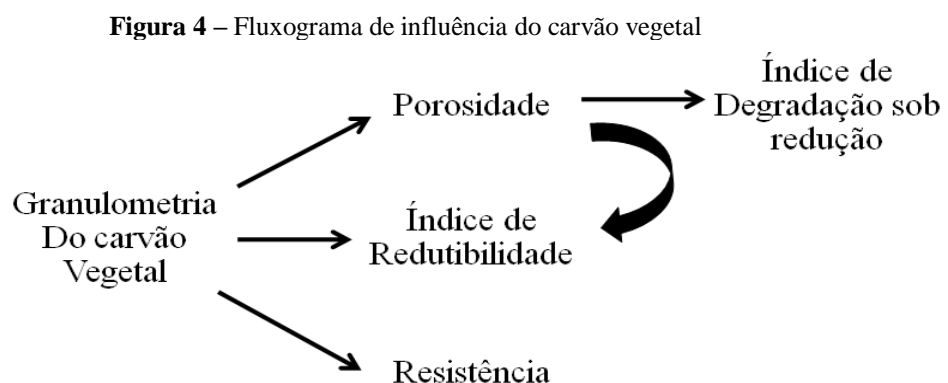
A MCV (moinha de carvão vegetal) possui um alto poder calorífico fundamental para uma reação de combustão e também para queima e aglomeração, como por exemplo, na produção do sinter de minério de ferro (ALVES, 2017). E também possui características atraentes tais como produtividade, qualidade e massa específica adequada, além do seu baixo custo (PINHEIRO et al., 2006).

O carvão, após a carbonização, é peneirado e classificado, por onde os finos abaixo de 12 mm são aproveitados na sinterização. A umidade influencia na operação; o teor de umidade é uma variável, pois durante o transporte, o carvão é sujeito às influências do clima. (ARAÚJO, 2005).

Conforme Alves (2017), o carvão vegetal é pobre na concentração de gases nocivos, enxofre e nitrogênio, em que o reduzido teor de enxofre é benéfico ao processo de redução de ferro no alto forno e também a menor geração de gases causadores do efeito estufa, em relação ao coque, portanto contribui de modo significativo para a preservação ambiental.

Telles (2015) cita que o carvão vegetal possui a vantagem de ser uma biomassa, ou seja, combustível renovável, pois a emissão de CO<sub>2</sub>, gerado por este que retorna ao ciclo ambiental; diferentemente do coque, onde sua extração causa danos permanentes no solo e emite gases de alta concentração de poluentes.

A MCV fornece energia para a queima no leito de sinterização e efetua a ignição do processo. A granulometria da MCV influencia na porosidade, redutibilidade e resistência do sinter (ARAÚJO, 2005). Se o tamanho das partículas for grande, há possibilidade de aumentar o índice de degradação sob redução (RDI) do sinter, devido à maior formação de poros. Entretanto, o aumento de poros aumenta o índice de redutibilidade (RI) do sinter (ALVES, 2017). A seguir um fluxograma representativo da influência do carvão vegetal (Figura 4).

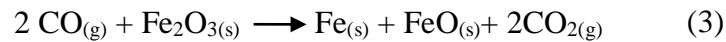


Fonte – Elaborado pelo autor (2018)

O carvão vegetal, como combustível, tem a função de reduzir os óxidos de minério de ferro, ele é a fonte do agente redutor da reação, como explica a Equação 1 (BARBIERI, 2013).



Este combustível implica nas reações de sinterização, principalmente no alto-forno, sempre produzindo gases carbonáceos, como CO que é o gás redutor e CO<sub>2</sub>, como exemplificados nas equações 2 e 3 a seguir:



### 2.1.3 Fino de Calcário Calcítico (FCC)

O Carbonato de cálcio CaCO<sub>3</sub> ou calcário calcítico é o fundente em questão neste processo de aglomeração estudado. Na natureza, encontra-se como calcita ou aragonita.

Este quando calcinado se torna a cal (CaO) e quando hidratado resulta no hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) (ARAÚJO, 2005).

Os fundentes aumentam a resistência mecânica quando se solidificam envolvendo a hematita e podem ser básicos, CaO e MgO, respectivamente o óxido de cálcio e óxido de magnésio ou ácidos, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub>, respectivamente a alumina e a sílica (ALVES, 2017).

O FCC se torna responsável pela remoção das impurezas, pois diminui o ponto de fusão destas e conseqüentemente reagem primeiro as baixas temperaturas e são removidas para escória, principalmente a sílica (ARAÚJO, 2005).

De acordo com Araújo (2005), as impurezas do minério de ferro, como a sílica e alumina são de elevado ponto de fusão, o que torna o fundente o principal responsável em tornar estas substâncias mais fusíveis (baixando seu ponto de fusão); e também, fornece reações, as quais as impurezas podem ser removidas na escória fluida.

## 2.2 Processo de Aglomeração

Este processo é basicamente a união de finos de minério, fundentes e combustíveis – todos com granulometria adequada –, em um aglomerado homogêneo que se viabilize nos

processos metalúrgicos. Destina-se aproveitar a grande quantidade de finos acumulados durante produção de minérios granulados ou de minérios com baixo teor de ferro, estes finos e fundentes (sílica, alumina, cal) são os constituintes da carga inserida no alto-forno (STARLING, 2012).

As cargas exigem uniformidade, isenção de finos, granulometria adequada, resistência mecânica e permeabilidade. A aglomeração visa à melhor permeabilidade da carga e o contato entre sólidos e o gás redutor, para baixar o “*coke rate*” e aumentar a velocidade da redução (ARAÚJO, 2005).

Os processos mais comuns de aglomeração de minério de ferro na siderurgia por três meios distintos são: briquetagem, pelotização e sinterização.

### 2.2.1 Briquetagem

As matrizes de conformação de briquetes (de finos) utilizam compactação a frio, ocasionando baixa produtividade, sendo inviável no processo de alto forno e sendo mais precisa em aglomeração de finos industriais (poeiras, lamas e resíduos) (INFOMET).

### 2.2.2 Pelotização

De acordo com Araújo (2005); Chemale e Takehara (2013) esse processo visa aglomerar os finos inferiores a 0,15 mm, *pellet feed*, para uma pelota de ordem 10 mm a 15 mm de diâmetro. A mistura é composta de minérios, insumos e água, operação realizada por rolamento (tambores rotativos).

Durante a pelotização, ocorre a formação da pelota crua verde, sendo necessário realizar o endurecimento por meio da queima; esta queima envolve quatro etapas, por onde percolam os gases de combustão a determinadas temperaturas até seu resfriamento. (ARAÚJO, 2005)

Esta operação apresenta menor quantidade de ganga, comparando com o sinter, pois é adicionado baixa concentração de CaO (fundente); é submetido a uma separação magnética até atingir 90% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. A pelotização é de alto custo, por ser um processo mais complexo (INFOMET).

### 2.2.3 Sinterização

É uma aglomeração por fusão de uma mistura de finos de minério, de combustível (coque ou carvão vegetal), de fundentes, de sínter de retorno, e em alguns casos de resíduos siderúrgicos (pó de aciaria, carepa de laminação, poeira etc.) e água (LOPES, 2012).

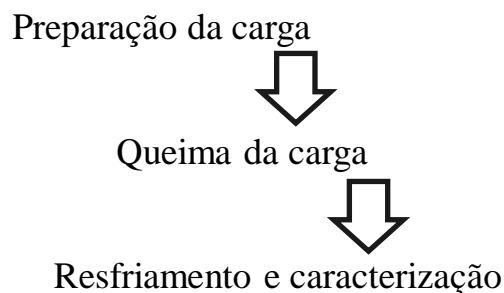
De acordo com Araújo (2005); Chemale e Takehara (2013) a sinterização tende interagir com os finos em uma faixa granulométrica de entre 0,15 mm a 12,5 mm, em que o calor da reação é fornecido pela combustão. No qual o calor da reação em altas temperaturas, transforma a massa de granulometria fina em carga bitolada.

Aglomeram-se a carga em uma massa porosa, pela fusão incipiente, causada pelo calor da queima do combustível. O fortalecimento entre as partículas resulta da difusão na fase sólida, através de amolecimento superficial, fusão parcial e formação de escória (ARAÚJO, 2005).

Segundo Lopes (2012) e Alves (2017), o material sinterizado é mais poroso, assim possui melhor percolação dos gases, porém baixa resistência mecânica por ser menos denso que o minério compactado, visto que a porosidade no sínter aumenta a reatividade da produção.

Araújo (2005) representa a operação do processo de sinterização em três etapas (Figura 5).

**Figura 5** - Fluxograma das etapas de sinterização do minério de ferro.



**Fonte** - Adaptado de Araújo (2005).

A caracterização envolve a britagem e o peneiramento, obtendo no fim o sínter e os finos de retorno, que serão reciclados na própria instalação. Estes finos de retorno resultam da sinterização incompleta, obtidos em faixa granulométrica inferior a 8 mm (ARAÚJO, 2005).

Conforme Araújo (2005), o minério ao ser utilizado na sinterização, é dosado e misturado com os finos de retorno, com os finos do combustível sólido (carvão vegetal ou

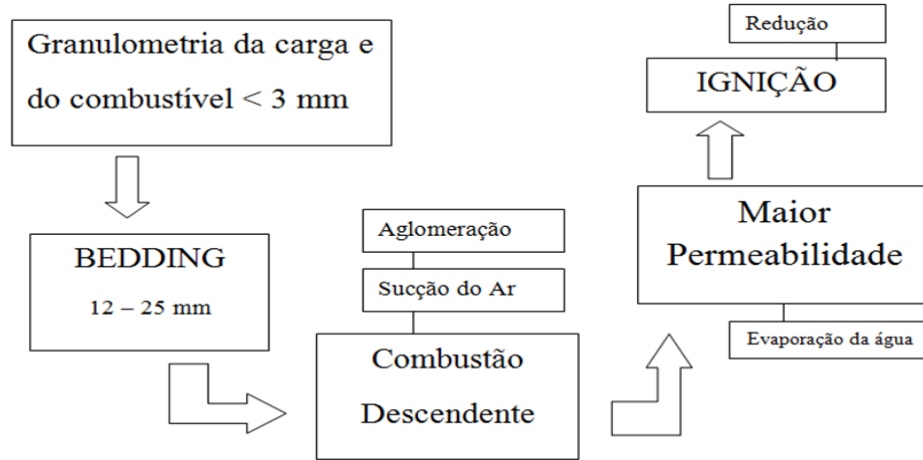
coque) e com os finos de fundente (calcário ou dolomita). A carga não deve ter mais de 10% de finos abaixo de 0,1 mm, senão a produtividade será prejudicada.

A seguir são apresentados alguns parâmetros citados por Araújo (2005) que proporcionam a sinterização:

- A Granulometria das adições e do combustível é de até 3 mm. Como proteção, é adicionada uma camada de sínter, nas dimensões de 12 a 25 mm, numa espessura de 25 a 40 mm, denominada de falsa grelha ou bedding. A vantagem da falsa grelha é de manter as barras das grelhas seguras, não tendo contato direto as altas temperaturas; o bolo de sínter não ficará aderente à grelha. O pó durante a queima é arrastado pelos gases e estes ficam retidos.
- A combustão propaga-se de cima para baixo, conforme a sucção do ar através da grelha. O ar fornece o oxigênio preciso para a combustão; os gases queimados servem como o preaquecimento do material. Por fim, as partículas se formam em pedaços maiores, ou seja, se unem pela zona de contato devido agitação das moléculas em alta temperatura, elas difundem e se aglomeram.
- Na mistura a sinterizar, é adicionada umidade, a qual durante o aquecimento, a água evapora e aumenta a permeabilidade. Durante a reação, a água de hidratação é removida; os carbonatos da reação dissociam e o combustível entra em ignição. No processo, os óxidos de ferro são parcialmente reduzidos, em contato do  $\text{CO}_2$ .
- As operações como secagem, preaquecimento, queima e resfriamento, seguem em camadas sobrepostas, no sentido de cima para baixo. Quanto mais próximo à grelha, maior a temperatura dos gases e, portanto, a perda de calor sensível.

A seguir um fluxograma representativo sobre esses parâmetros do processo de sinterização do minério de ferro (Figura 6).

**Figura 6** – Fluxograma dos processos de sinterização do minério de ferro



Fonte – Elaborado pelo autor (2018)

Ainda de acordo com Araújo (2005), inicialmente a ganga do minério participa na formação da escória, e com o aumento da temperatura o ferro entra em solução. A presença de sílica possibilita a formação de silicatos de ferro, portanto, a adição de cal reduz esse perigo, pois o CaO tem maior afinidade pela SiO<sub>2</sub> que o FeO. A camada de escória formada influencia na porosidade e sobre a oxidação. Os constituintes da escória são a ganga de minério, a cal (ou calcário) e as cinzas do carvão (vegetal ou coque).

A sinterização é um processo de oxidação, sendo necessária que o ar para a combustão do carvão chegue à zona de queima com volume e velocidade precisa, para se atingir a temperatura de sinterização, superior a 1.450°C, o mais rápido possível. Esta consome 2.093 a 2.930 kJ/kg (500 a 700 kcal/kg).

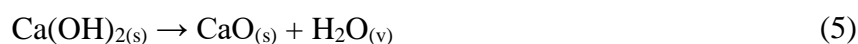
As reações na sinterização do minério de ferro conforme Dawson (1993) são ditas como reações em estado sólido: sólido-sólido e sólido-gás, fusão dos produtos das reações em estado sólido para criar o líquido primário, desagregação dos sólidos na porção fundida para produzir o líquido secundário, recristalização das fases minerais a partir dos líquidos gerados.

Conforme Dawson (1993) e Araújo (2005), as principais reações decorrentes no processo de sinterização:

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

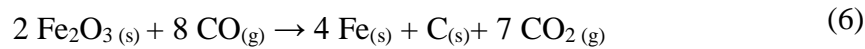


b) Desidratação: 400 a 500°C - vaporização da água combinada:

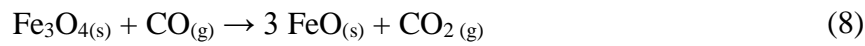
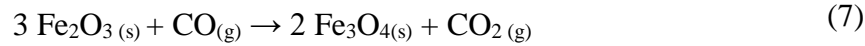


c) Redução superficial do minério de ferro:

As primeiras reações de redução têm lugar a 470°C, onde a hematita é reduzida:



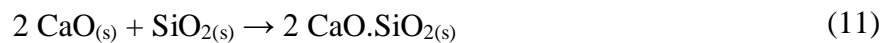
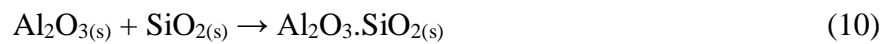
Acima dos 500°C até 620°C, outra parte do minério é reduzida.



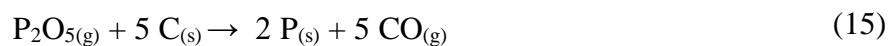
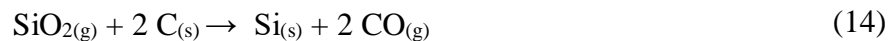
d) Decomposição de carbonatos (750 a 1150°C), precisamente aos 970°C o calcário é calcinado:



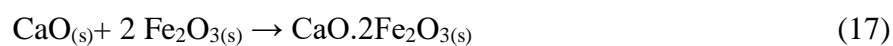
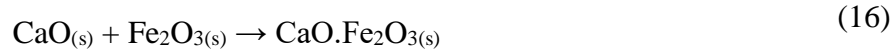
e) Formação de silicatos: 600 a 1300°:



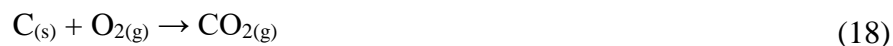
f) Redução dos óxidos de manganês, de silício e de fósforo, a partir de 1200°C:



g) Formação de Cálcio-ferritas: 600 a 1300°C:



h) Combustão do Carvão: 1300°C



i) Formação da magnetita:



O processo finaliza quando a temperatura reduz para abaixo de 1100°C, apesar de que wustita ou magnetita podem ainda ser oxidadas.

## 2.4 Sínter

É o produto da sinterização. A mistura: finos de retorno, combustível, fundente, umidade e dentre outros insumos, proporcionam a formação do que chamamos de bolo de sínter.

Segundo Alves (2017), os sínteres são definidos por:

- Não Auto-Fundente: proveniente de minério hematítico ou magnetítico com estéril de sílica e ao qual não acrescenta nenhuma base (CaO ou MgO);
- Auto-Fundente: quando é adicionada bases, podendo ser ácida para  $\text{CaO/SiO} < 1$ , ou básica para  $\text{CaO/SiO} > 1$ .

De acordo com Araújo (2005), este quando deixa a máquina de sinterizar, um conjunto de esteira e grelhas, deve ser reduzido (quebrado) a dimensões adequadas e os finos, separados por peneiramento.

A classificação desejada é peneiramento a quente, assim reduzindo a massa a resfriar e produzindo um leito mais permeável à passagem do ar de resfriamento, então se removem os finos (ARAÚJO, 2005).

Após o resfriamento, o sínter é britado e peneirado, classificando-o:

- 0 – 8 mm, como finos de retorno;
- 8 – 15 mm, como sínter de produção e;
- 15 – 25 mm, como falsa grelha (bedding).

É possível definir um bom sínter conforme suas propriedades mecânicas (resistência); propriedades físico-químicas (porosidade, redutibilidade, reatividade, etc.); e seu aspecto e estrutura. Procura-se produzir um sínter de basicidade adequada (de menor valor possível) a adição de moinha de carvão vegetal.

Visa-se uma composição da mistura com:  $\text{SiO}_2 = 4,5\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1,0\%$ ,  $\text{P} \leq 0,45\%$  e  $\text{Fe} \geq 64,0\%$  (ARAÚJO, 2005). Durante a preparação do sínter, ocorrem à combustão e percolação dos gases, reações nas altas temperaturas, formando óxidos e escória influenciados pela quantidade de fundente adicionado.

O maior grau de oxidação do sínter facilita a operação, pois a redução de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  para  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , por meio do CO, é exotérmica; por outro lado a redução do  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  para FeO pelo CO é endotérmico (ARAÚJO, 2005).

De acordo com a Tabela 2, observam-se as características do sínter:

**Tabela 2** - Características do sinter.

<b>Características do Sinter</b>		
Reaproveitamento dos finos entre 0,15 mm a 8,0 mm	Elevado teor de ferro	Porosidade implica na resistência e na ductilidade
Baixa degradação	Não conter elementos indesejados (ex.: zinco)	Alta redutibilidade
25% a 50% são finos de retorno.		

Fonte - Adaptado de Araújo (2005) e Alves (2017).

A porosidade, uma das propriedades que caracterizam a formação do sinter, é a fração de vazios ( $\epsilon$ ) no sistema em relação ao volume total (BERGMAN et al., 2010).

De acordo com Infomet, a presença de poros permite que os gases percolam livremente, aumentando a reatividade (produtividade); a quantidade excessiva de finos prejudica a homogeneidade da passagem de gás, pois estes podem se alojar entre os poros. De acordo com Araújo (2005), o bom sinter apresenta de 20 a 25 % de microporosidade

A porosidade influencia diretamente na redutibilidade e na resistência (ARAUJO, 2005; BERGMAN et al., 2010). E quando adicionado insumos na produção do sinter, pode haver uma variação no teor de FeO. Por exemplo, adição de carepa de laminação. Este resíduo aumenta o teor de FeO fazendo com que a redutibilidade diminua (NEVES et al., 2016). Teores de FeO em elevados percentuais atrapalha a propriedade de redutibilidade do sinter (LOPES, 2012).

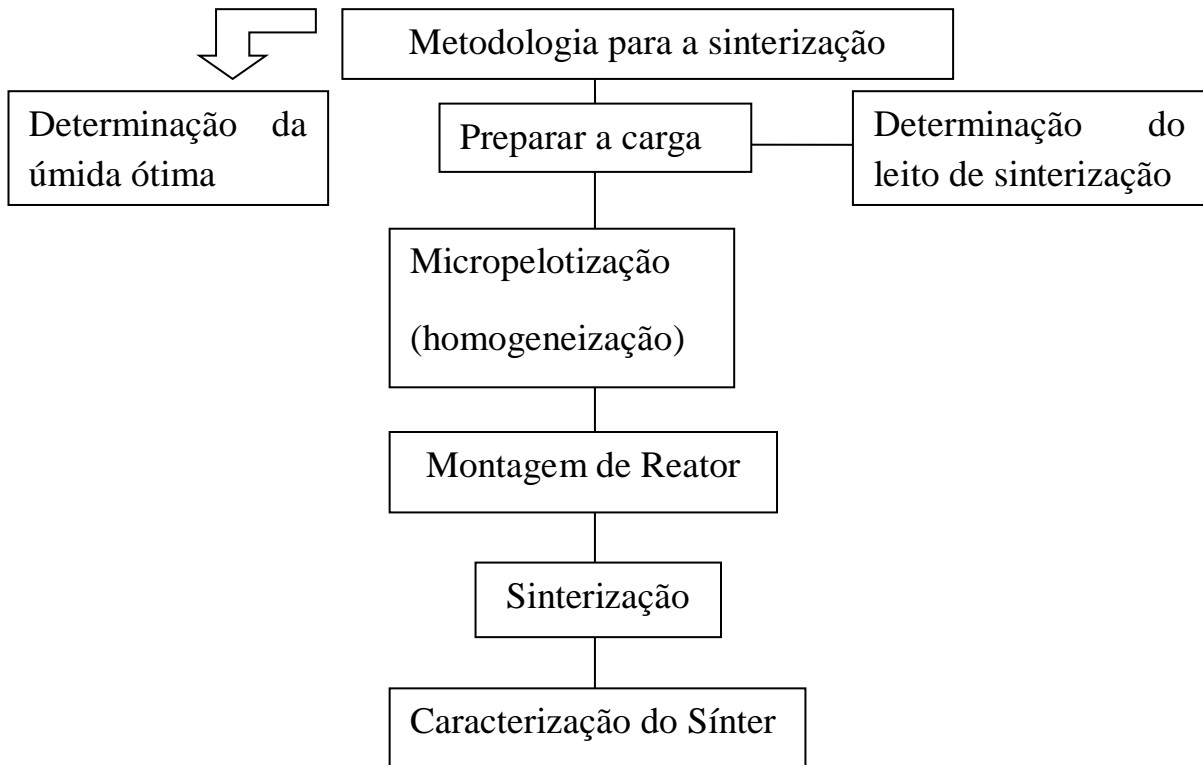
O Índice de Redutibilidade (RI) está relacionado à estrutura mineral e a porosidade do sinter (LOPES, 2012). A redutibilidade refere-se à facilidade de remover o oxigênio combinado com óxido de ferro. Maior RI indica maior desenvolvimento de reação indireta, ou seja, menor taxa de carvão e maior produtividade (FAN et al.; 2016)..

Conforme Bergman et al., (2010), no interior do meio poroso ocorre uma transferência de calor, entre os sólidos e o fluido que percorre o sistema. Neste caso consideramos o meio poroso como saturado ou leito recheado, constituído pela fase sólida estacionária, através da qual o fluido escoar e as posições das partículas são fixas. O fluido, que é o gás que percola o sistema, está em escoamento irregular entre os poros, assim melhorando o transporte através da mistura.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir um fluxograma do processo (Figura 7).

Figura 7 – Fluxograma da metodologia



Fonte – Elaborado pelo autor (2018)

#### 3.1 Materiais

Este trabalho utilizou os finos de minério de ferro, finos de calcário calcítico  $\text{CaCO}_3$  e moinha de carvão vegetal, como componentes essenciais para a sinterização. Três recipientes (pequeno, médio e de grande porte) de volumes distintos foram utilizados para armazenar as matérias-primas, de onde posteriormente utilizou-se para secagem. Proveta de 200 ml; dentre outros equipamentos indispensáveis, como a estufa; betoneira; forno de leito fixo (reator); conjunto de termopar; exaustor; dutos de saída de gases; anemômetro, balança e conjunto de peneiras.

Na Figura 8, são exibidas as matérias-primas utilizadas para composição da sinterização: os finos de minério de ferro (FMF), combustível (MCV) e o fundente (FCC). Estas foram cedidas pela empresa SINOBRAS localizada em Marabá.

**Figura 8-** Matérias Primas: FCC, FMF e MCV, respectivamente.



**Fonte** – Elaborado pelo autor (2018).

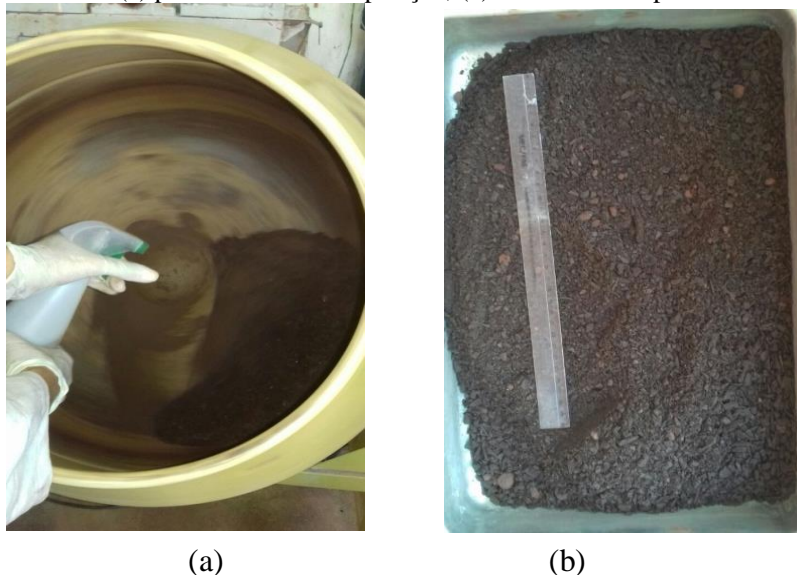
### 3.2 Métodos

#### 3.2.1 Determinação do teor de umidade ótima

É necessário para determinar a quantidade de água precisa à micropelotização (menor massa específica aparente). Utilizou-se uma composição de 1 kg de mistura, onde 700 g são de FMF, 200 g de MCV e 100g de FCC.

Esta mistura foi colocada no tambor de micropelotização e então se realizou a micropelotização. Adicionou-se 10% de água, sendo pulverizada, como vista a seguir na Figura 9.

**Figura 9** - Composição de 1kg para determinação do teor de umidade ótima:  
(a) pulverizando a composição, (b) material micropelotizado.



(a)

(b)

**Fonte** – Elaborado pelo autor (2018).

Após a pulverização, a cada 1% de água adicionada, retirou-se uma amostra da composição usando um Becker e pesou-se, com a finalidade de determinar o teor de umidade

ótima da amostra em questão, ou seja, a menor massa aparente; repetiu-se esse procedimento por 10 vezes durante toda a micropelotização, totalizando os 10% de umidade. Vale ressaltar que a massa do Becker foi de 305 g, utilizada para posteriormente calcular a massa específica aparente de cada amostra,  $\text{massa da amostra (g)} / \text{massa do Becker (g)}$ .

A micropelotização para obtenção da umidade ótima foi realizada em triplicata. A massa específica aparente foi obtida a partir média dos menores valores de massa encontrados entre os três experimentos, que foi de  $1,3 \text{ g/cm}^3$ .

### 3.2.2 Condições para o Processo de Sinterização

#### 3.2.2.1 Procedimentos para a produção de formação do sinter

- Mediu-se a massa da matéria prima (finos de minério de ferro, de carvão e calcário);
- Secou-se por 24 horas a  $105^\circ\text{C}$  e medir a massa seca;
- Mediu-se o teor de água a ser adicionado;
- Homogeneizou-se (mistura da matéria prima) e adicionou-se o volume de água a ser utilizado, assim procedendo a micropelotização;
- Adicionou-se a misturada homogeneizada no reator;
- Adicionou-se uma camada de carvão acima da mistura a sinterizar;
- Iniciou-se o processo de sinterização.

#### 3.2.2.2 Montagem do equipamento

- Preparar e limpar o forno vertical de leito fixo antes da operação;
- Instalação dos termopares, exaustor e duto de saída de gases;
- Vedação do reator com argila e silicone para alta temperatura;
- Instalação dos cabos dos termopares no aparelho de aquisição de dados de temperatura;
- Inserir o anemômetro na parte superior do reator de leito fixo para medir a temperatura e a velocidade de vazão;
- Inserir-se a falsa grelha – sinter britado (*Bedding*), adicionado ao fundo do forno;
- Instalação do maçarico (queimador);
- Com o início da aglomeração deve-se iniciar a gravação dos dados e valores de temperatura.

Os termopares foram inseridos em ordem de aquecimento (1,2,3,4,5,6,7 acoplados no reator e o oitavo colocado por fora ao redor do reator, para medir a temperatura externa).

Cada termopar foi identificado respectivamente nos canais do aparelho de aquisição de dados, o *Paperless Recorder* do tipo PHL (CH1, CH2, CH3, CH4, CH5, CH6, CH7 e CH8), iniciou-se a uma temperatura de 140°C.

### 3.2.3 Composição do leito de sinterização

Para determinar a massa da carga a ser inserida no forno, foi necessário calcular o volume a ser carregado no forno; o diâmetro da câmara de combustão  $D$  é de 15 cm e a altura do leito de sinterização,  $h$ , é de 45 cm.

$$\begin{aligned} V &= (\pi \times D^2 / 4) \times h & (21) \\ V &= (3,14 \times 15^2 / 4) \times 45 \\ V &= 7948,125 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

Portanto, usou-se o valor de 7948,125cm<sup>3</sup> para calcular a massa, em kg, para o processo de aglomeração. Ao se utilizar 15% de MCV, foi usado 10% de FCC e 75% de FMF e para 20% de MCV, utilizaram-se 10% de FCC e 70% de FMF. Essa mudança de percentual de FMF e MCV foram proporcionais entre si. Aumentando-se o teor de moinha de carvão, reduz-se o do minério de ferro.

Após a determinação do volume, multiplicou-se pelo valor de massa específica. Somente então se determina o valor de massa seca para a composição da carga.

$$\begin{aligned} \text{Massa} &= \text{Vol} \times M_{\text{ESP}} & (22) \\ \text{Massa} &= V = 7948,125 \text{ cm}^3 \times 1,3 \text{ g/cm}^3 \\ \text{Massa} &= 10332,5625 \end{aligned}$$

O valor de massa foi aproximado para 10,3 kg, para uma base de cálculo mais precisa. Então, aumentou-se 10% de massa para que após o processo de secagem se obtenha o valor de massa seca mais próximo possível do valor calculado. Após isso o material foi colado para secar por 24h horas a 105°C, como visto nas tabelas a seguir.

A Tabela 3 apresenta a quantidade de material para a preparação da carga com 15%

de MCV, 75% de FMF e 10% de FCC.

**Tabela 3** - Composição do leito com 15% de MCV.

<b>MATERI AL</b>	<b>% em MASSA</b>	<b>MASSA (kg)</b>	<b>MASSA (kg) +10%</b>	<b>MASSA APÓS SECAGEM (kg)</b>
<b>FMF</b>	75,0	7,725	8,497	8,2765
<b>MCV</b>	15,0	1,545	1,699	1,5778
<b>FCC</b>	10,0	1,030	1,133	1,065
<b>TOTAL</b>	100,0	10,300	11,328	10,9193

**Fonte** – Elaborado pelo autor (2018).

A Tabela 4 apresenta a quantidade de material para a preparação da carga com 20% de MCV, 70% de FMF e 10% de FCC.

**Tabela 4** - Composição do leito com 20% de MCV .

<b>MATERI AL</b>	<b>% em MASSA</b>	<b>MASSA (kg)</b>	<b>MASSA (kg) +10%</b>	<b>MASSA APÓS SECAGEM (kg)</b>
<b>FMF</b>	70,0	7,210	7,931	7,765
<b>MCV</b>	20,0	2,060	2,266	2,135
<b>FCC</b>	10,0	1,030	1,133	1,060
<b>TOTAL</b>	100,0	10,300	11,330	10,961

**Fonte** – Elaborado pelo autor (2018).

Sendo necessário apenas 10,3 kg, para ambas as análises. Esta massa irá servir como carga de alimentação para o reator. Porém, antes, irá passar pelo processo de micropelotização.

### 3.2.4 Micropelotização

Visa a aderência entre as partículas das matérias-primas da mistura, a qual é depositada na betoneira para que haja a formação de micropelotas, antes de inserir no reator.

A betoneira possui 30  $\frac{1}{4}$  de rpm (rotação por minuto). Foi preciso 5 (cinco) minutos de rotação para uma melhor aglomeração da mistura.

Tanto para a mistura com 15% de MCV como de 20% de MCV, utilizando a massa 10,3 kg da mistura, foi adicionado o teor de 10% de água obtida a partir do ensaio de umidade ótima, ou seja, 1030,0 ml, por meio de uma pulverização. Sendo assim, a inserção da água ajudou na formação das micropelotas da mistura (Figura 10). A mistura já micropelotizada, foi descarregada no interior do reator sobre a falsa grelha.

**Figura 10** – Micropelotização (composição inserida na betoneira)



**Fonte** – Elaborado pelo autor (2018).

### 3.2.5 Sinterização

Antes do processo, foram registradas a temperatura e a velocidade média de entrada de ar da câmara de sinterização do reator. A vazão de ar foi verificada já com o exaustor ligado (fazendo o processo de sucção de ar).

Estando o reator vazio, registrou-se 30,9°C para a temperatura e 17,9 m/s para a velocidade média do ar. Então foi adicionada a falsa grelha (*bedding*), a carga para sinterizar e mais uma fina camada de 15 cm de moinha de carvão acima da carga, e a temperatura foi para 32° c e 0,9 m/s, sua velocidade média do ar; ambas as medições com o exaustor ligado. Foi utilizado o anemômetro para tal medição (Figura 11).

**Figura 11** - Anemômetro.

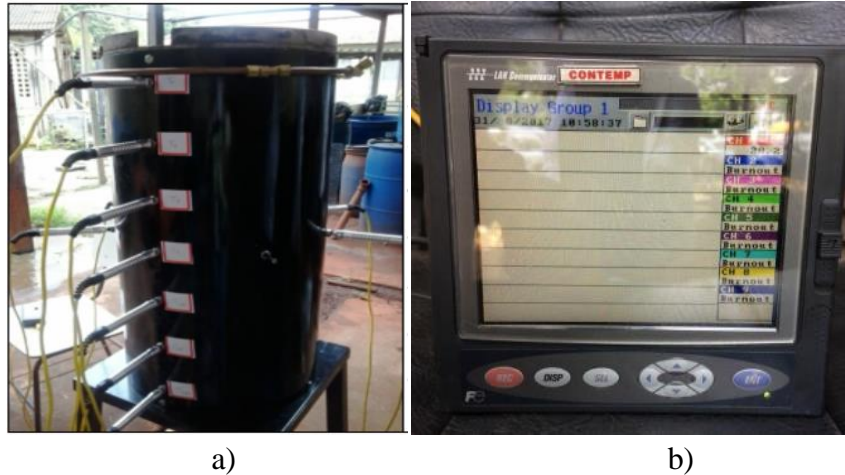


**Fonte:** Elaborado pelo autor (2018)

Os fatores que influenciam no reator (forno de leito fixo) durante o processo e qualidade do sínter são principalmente a vazão de ar; a faixa granulométrica; a altura do leito e a umidade.

Após a inserção da carga, foi aceso o maçarico. O aparelho de aquisição de dados determina, a cada cinco segundos, a variação de temperatura, conforme os termopares posicionados e indicados nos canais respectivos do aparelho; iniciou-se o processo de sinterização, processo representado pelos equipamentos na Figura 12.

**Figura 12** - Equipamentos para o processo de sinterização. a) Termopares inseridos no reator vertical de leito fixo; b) O Paperless Recorder do tipo PHL.



Fonte – a ) Neves, 2016. b) Elaborado pelo autor (2018).

Obtém-se o tempo necessário para que ocorram todas as reações e queima da carga.

### 3.2.6 Caracterização do Sínter

#### 3.2.6.1 Caracterização físico-química e morfológica

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

O sínter foi caracterizado morfológicamente através do Microscópio Óptico (MO) 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.

Também foi usado o Difratoograma de Raios-X (DRX) para identificar um determinado mineral contido na amostra no sínter do minério de ferro, a partir da caracterização de sua estrutura cristalina; e também foi usada a da técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX) para uma exatidão e precisão de caracterização dos constituintes da amostra, determinando a teor de cada óxido presente na amostra.

### 3.2.6.2 Simulação Física do Processo de Sinterização - Teste de tamboreamento

As simulações, em quantidades suficientes para testes físicos, avaliam as propriedades do síter. Dentre os procedimentos de caracterização pode-se citar: o ensaio de determinação do índice de tamboreamento, ensaio de avaliação de degradação sob redução e determinação da redutibilidade do síter (STARLING, 2012); neste trabalho foi apenas realizado o tamboreamento.

Visa medir a resistência a abrasão do material, quando este é submetido ao atrito com as paredes da moinha e entre a própria carga, ou seja, o material é inserido em um sistema onde haverá atrito entre o próprio material e a parede interna, estando em rotação.

Procedimento realizado a partir da análise de dois sínteres formados, com 15% e 20% de moinha carvão vegetal, em uma granulometria entre 7,93 mm e 9,52 mm.

É usada a betoneira (micropelotizador), para o atrito do material. Portanto, foi preciso 200 voltas com o material dentro para que haja melhor rendimento da carga; 200 voltas considerando sete minutos em rotação. Usa-se 1 kg de síter.

Após as voltas, é retirado o material e classificado em uma peneira de 6,3 mm. Então se pesa a massa do material retido na peneira e o passante para calcular o percentual das massas e o índice de tamboreamento expresso com base na percentagem apenas do material retido.

Índice de tamboreamento  $T_I$  (%) expresso por:

$$T_I = \frac{P_f \times 100}{P_i} \quad (23)$$

Onde  $P_i$  é massa total em kg e  $P_f$  é massa retida em kg.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Teor de Umidade ótima

O resultado do teor de umidade ótima foi o mesmo para ambos os sínteres, 10% de água; pelo fato dos teores de moinha de carvão ser próximas, 15% e 20%, não havendo assim a necessidade de se utilizar diferentes teores, além de propiciar um menor consumo de energia térmica no processo de secagem, utilizando-a no processo de sinterização.

A Tabela 5 mostra os menores valores requerentes à triplicata do procedimento.

**Tabela 5** - Determinação da umidade ótima e massa específica aparente.

	<b>Menor massa da amostra (g)</b>	<b>Massa esp. Ap. (g/ cm<sup>3</sup>)</b>
<b>1°</b>	386,5	1, 267
<b>2°</b>	387,5	1, 270
<b>3°</b>	389,0	1, 275

**Fonte** – Elaborado pelo autor (2018).

Faz-se então o cálculo para determinar a densidade aparente, ou massa específica aparente. Sabendo que há 1% de água em cada amostra. Usou-se uma média das três massas.

$$D_{ap} = M_{esp} = (\Sigma m_{esp}) / 3 \quad (24)$$

$$\Sigma m_{esp} / 3 = (1, 267 + 1,270 + 1,275) / 3 \therefore 1,27 \approx \mathbf{1,3 \text{ g/cm}^3}$$

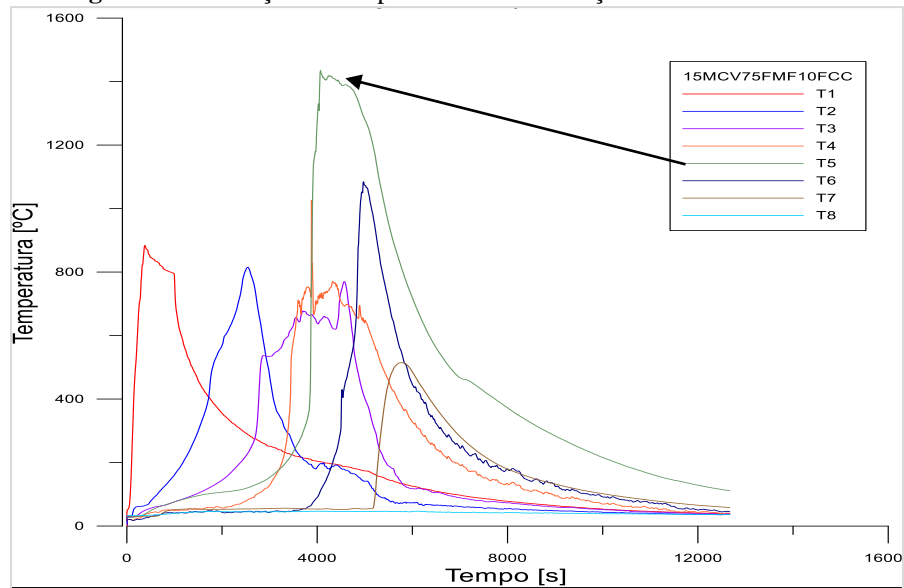
Mostraram-se ideal 10% de umidade para sinterização da carga com 15% e 20% de MCV.

## 4.2 Sinterização

### 4.2.1 Evolução da Temperatura

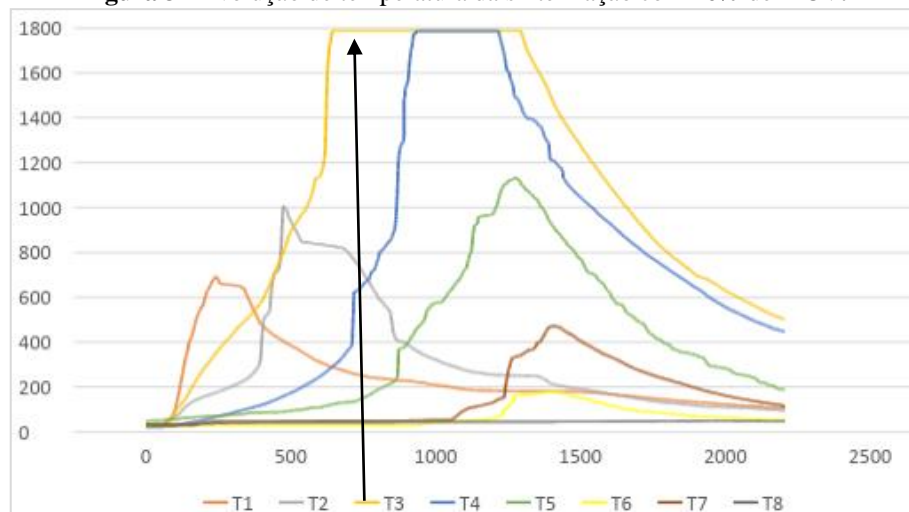
As Figuras 13 e 14 apresentam os gráficos de temperatura, por qual foi determinado através do aparelho de aquisição de dados e pelos termopares inseridos no reator, cada um em uma altura específica.

**Figura 13** - Evolução de temperatura da sinterização com 15% de MCV.



Fonte – Elaborado pelo autor (2018).

**Figura 3** - Evolução de temperatura da sinterização com 20% de MCV.



Fonte – Elaborado pelo Autor

Os valores mais elevados de valores de temperatura são indicados pelos maiores picos, representados pelos resultados obtidos nos termopares T5 e T3, respectivamente nos gráficos com 15% e 20% de MCV. Alcançando até 1800°C, no processo de sinterização com 20% de MCV.

#### 4.2.2 Sínter

Com o término do processo, aproximadamente duas horas e vinte e cinco minutos, os equipamentos foram desligados e já se encontrava um produto aglomerado, homogêneo e poroso; o sínter de minério de ferro (Figura 15).

**Figura 45 - Sínter.**



**Fonte** – Elaborado pelo autor (2018).

### 4.3 Caracterização do sínter

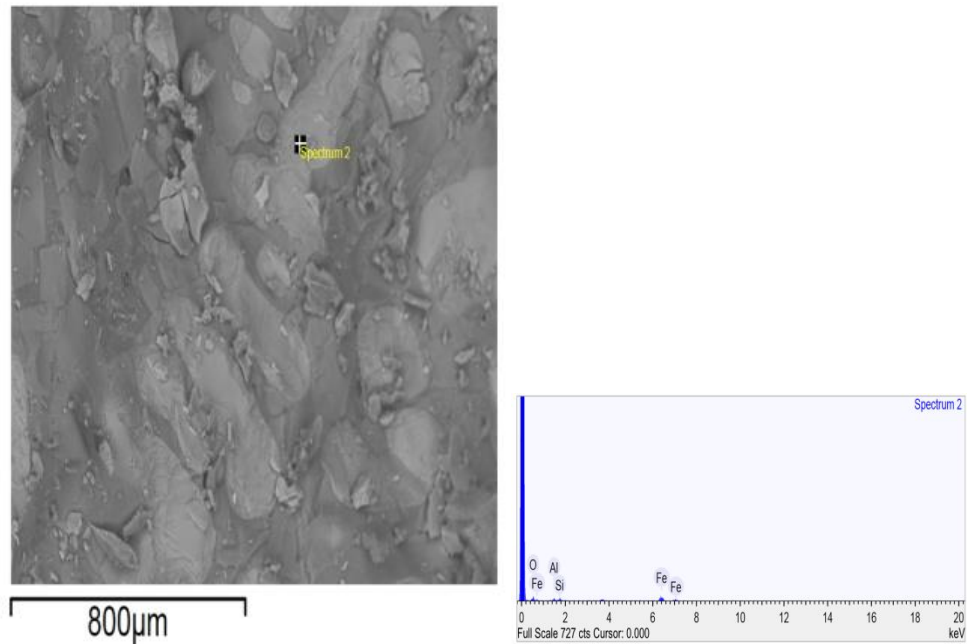
#### 4.3.1 Análise físico-química e morfológica

##### 4.3.1.1 EDS

O EDS foi utilizado para determinar os elementos encontrados na amostra de sínter. A seguir, apresentam-se as análises semi- quantitativas de EDS na amostra do sínter com 15% e 20% de MCV, Figura 16 e Figura 17, respectivamente.

Na análise (Figura 16) com 15% de MCV, identificamos a concentração de Oxigênio (O) de 15,9%, Alumínio (Al) 10,3%, Sílica (Si) 9,8% e ferro (Fe) de 64,0%, totalizando os 100,00%. Encontra se o percentual de ferro em maior concentração.

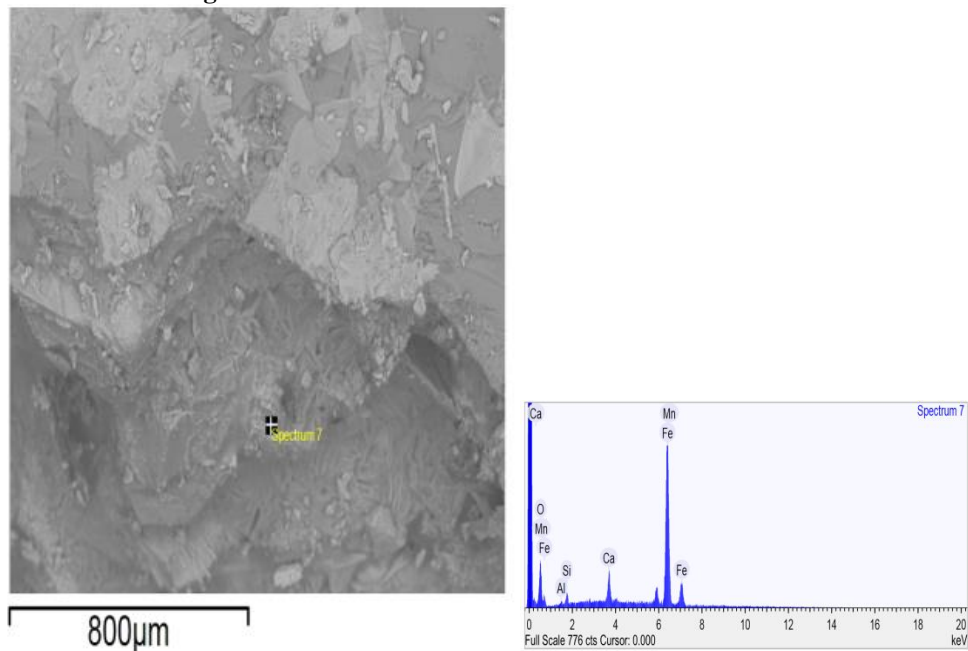
**Figura 56** - EDS da amostra de sínter com 15% de MCV.



**Fonte** – Elaborado pelo autor (2018)

Nesta outra análise (Figura 17) de 20% de MCV, identificamos a concentração de cálcio (Ca) de 4,32%, oxigênio (O) de 19,1%, Manganês (Mn) de 5,34%, alumínio (Al) de 0,66%, sílica (Si) 2% e ferro (Fe) de 68,58%, totalizando os 100,00%.

**Figura 6** - EDS da amostra de sínter com 20% de MCV.



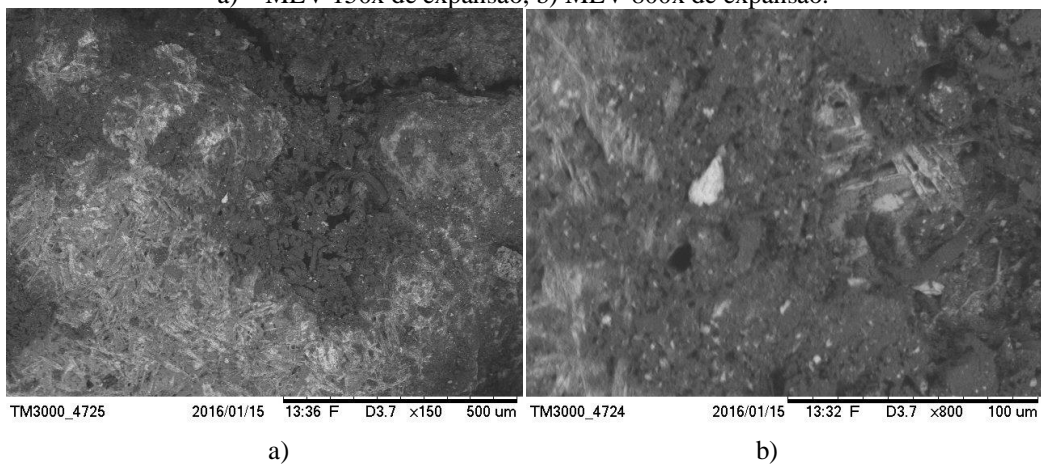
**Fonte** - Elaborada pelo autor (2018).

Mesmo identificando poucos elementos, as amostras de sinteres apresentaram um ótimo resultado em alto percentual de ferro, indicando que o material produzido possui teor ideal para utilização posterior no processo de redução do ferro para obtenção do ferro gusa.

#### 4.3.1.2 MEV

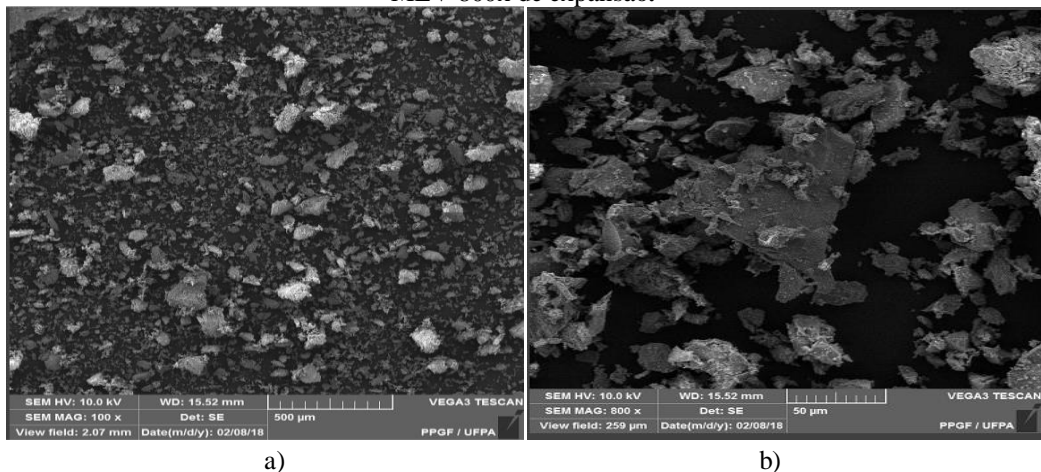
Feita a análise da morfologia do sinter, pelo MEV, para ambas as amostras com 15% e 20% de MCV, encontrou-se algumas formas irregulares e partículas mistas onde há formação de aglomeração de partículas menores sobre as maiores. Também identificou-se grande presença de poros, o que já se esperava, pois é uma característica principal. Estas características morfológicas estão apresentadas nas Figuras 18 e 19, a seguir.

**Figura 78** - Morfologia do sinter com 15% de MCV analisado através do MEV. a) – MEV 150x de expansão; b) MEV 800x de expansão.



Fonte - Elaborada pelo autor (2018).

**Figura 89** - Morfologia do sinter com 20% de MCV analisado através do MEV. a) MEV 100x de expansão; b) MEV 800x de expansão.



Fonte - Elaborada pelo autor (2018).

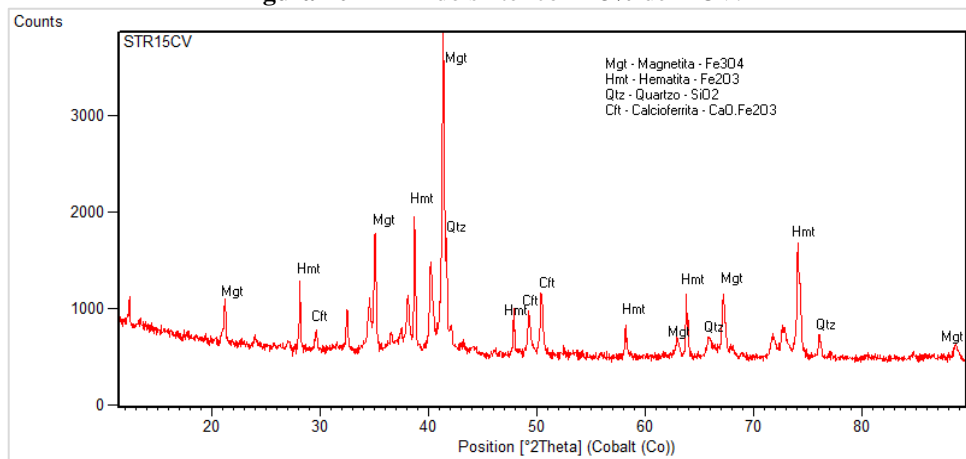
A primeira imagem (a) com baixo grau de percepção, de aumento de 100x; e outra imagem (b) com um aumento mais visível, na faixa de 800x, maior percepção das partículas e dos poros.

#### 4.3.1.3 DRX

Determinaram-se os seguintes minerais, nas amostras do sinter de minério de ferro.

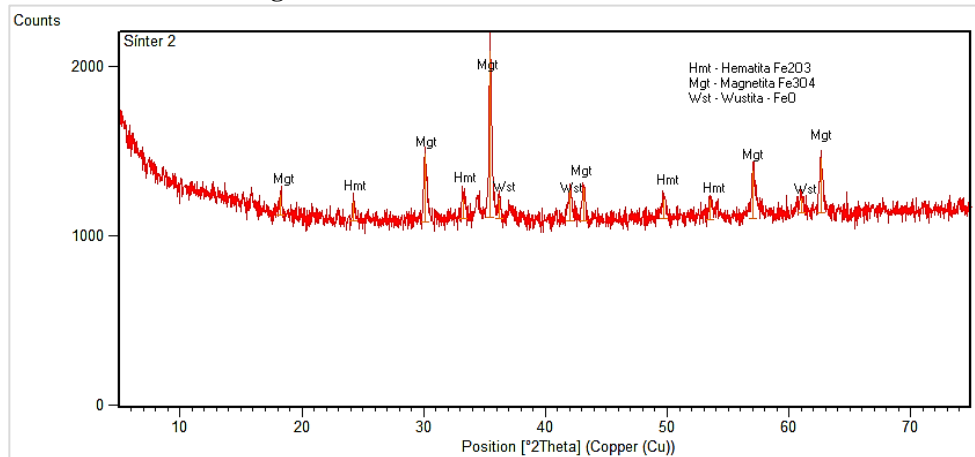
Primeiramente, caracterizou-se a amostra com 15% de MCV. Apresentando a predominância de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), e também a presença da hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e Calcioferrita ( $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Conforme a Figura 20.

**Figura 20** - DRX do sinter com 15% de MCV.



Fonte - Elaborada pelo autor (2018).

Segunda análise foi caracterizada a amostra com 20% de MCV. Com a predominância de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), e também a presença da hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e wustita ( $\text{FeO}$ ). Apresentada na Figura 21.

**Figura 29** - DRX do sínter com 20% de MCV.

**Fonte** - Elaborado pelo autor (2018).

#### 4.3.1.4 FRX

A análise é utilizada para determinar a porcentagem molar dos óxidos presentes na amostra.

A primeira amostra, o sínter com 15% de MCV, foi analisado e identificaram-se os seguintes óxidos apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6** - FRX do sínter com 15% de MCV.

Sínter – 15% MCV	
Componente	% m/m
SiO <sub>2</sub>	8,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	73,7
TiO <sub>2</sub>	0,16
MgO	0,56
CaO	11,5
K <sub>2</sub> O	0,15
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,13
MnO	1,0
<b>Total</b>	<b>100,00</b>

**Fonte** – Elaborada pelo autor (2018)

A segunda amostra, o sínter com 20% de MCV, foi analisado e identificaram-se os seguintes óxidos apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7** - FRX do sinter com 20% de MCV.

Sinter – 20% MCV	
Componente	% m/m
MgO	0,561
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,11
SiO <sub>2</sub>	10,6
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,213
SiO <sub>3</sub>	0,215
K <sub>2</sub> O	0,495
CaO	10,2
TiO <sub>2</sub>	0,179
MnO	0,695
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	74,0
PrSO <sub>11</sub>	0,134
Nd <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,345
<b>Total</b>	<b>99,75</b>

**Fonte** – Elabora pelo autor (2018)

Na segunda amostra, perceberam-se os óxidos que estão presentes em ambas, como por exemplo, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MnO por serem minerais secundários que são constituintes da matéria prima utilizada na mistura da produção do sinter de minério de ferro e também identificou outros óxidos com baixo teor, como o PrSO<sub>11</sub> e o Nd<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.

As duas amostras, 15% e 20% de MCV, identificaram a predominância do Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, hematita, em alto percentual por ser o óxido característico e determinante deste minério, acima dos 70%.

A análise de perda ao fogo não foi significativa, pois foram atingidas temperaturas superiores a 1200 °C durante o processo de sinterização e assim o processo de calcinação de todo composto presente no sinter já havia sido realizado, ou seja, a perda ao fogo não apresentou valores, sendo-o igual a zero.

#### 4.3.2 Análise de Resistência à abrasão, através do ensaio de tamboreamento dos sínteres

Então é realizada a simulação física e caracterização mecânica por 200 rotações no micropelotizador, considerando 7 minutos. Por fim se pesou o material retido para calcular o índice de tamboreamento.

A Figura 22 mostra a pesagem de 1 kg de sinter, conforme a granulometria precisa.

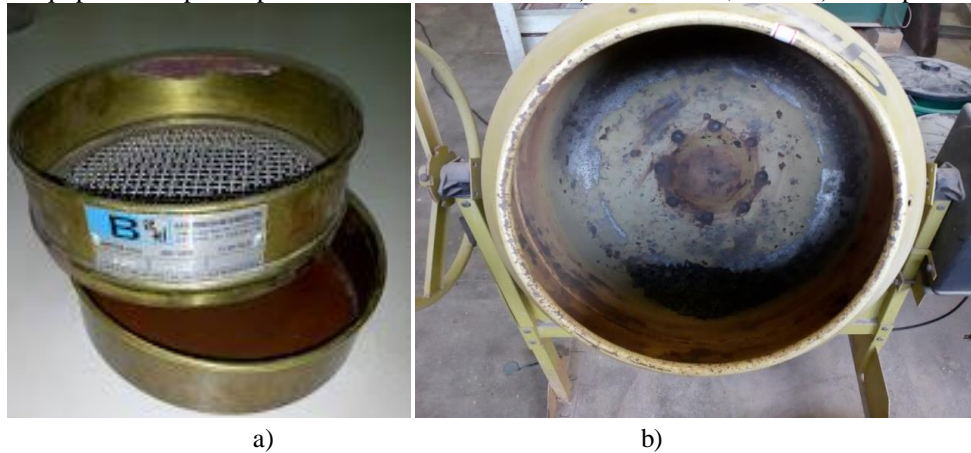
**Figura 22** - Pesagem do sínter a 1 kg.



**Fonte** – Elaborado pelo autor (2018).

A Figura 23 a seguir mostra-se os materiais utilizados no procedimento.

**Figura 10** - Equipamentos para o processo de tamboreamento. a) Peneira de 6,3 mm. b) Micropelotizador.



a)

b)

**Fonte** - Elaborado pelo autor (2018).

Utilizando a equação 23 para encontrar o índice de tamboreamento, construiu-se a Tabela 8 para os valores de massa retida de partículas acima de 6,3 mm, mostrada a seguir.

**Tabela 8** - Índice de tamboreamento dos sínteres.

Simulação	Massa Retida (g)	Índice de Tamboreamento (%)
<b>1° Tamboreamento (T<sub>1</sub>)</b>	598,8	59,88
<b>2° tamboreamento (T<sub>2</sub>)</b>	574,3	57,43

**Fonte** – Elaborado pelo autor (2018).

T<sub>1</sub> é equivalente ao sínter com 15% de MCV e T<sub>2</sub> ao sínter com 20%.

O melhor resultado foi obtido com o sínter a 15% de MCV, pois seu índice de tamboreamento foi superior ao de 20%, conforme Telles (2015) indicou que o aumento do teor de carvão vegetal diminui a resistência a abrasão dos sínteres; ou seja, o material com 15% de MCV é mais resistente ao ensaio e possui menor índice de degradação.

## 5 CONCLUSÃO

A moinha de carvão vegetal mostrou-se eficaz no processo de aglomeração para obtenção do sínter do minério de ferro, se assim forem considerados os aspectos morfológicos; apenas havendo diferença na característica física, no processo de ensaio físico de tamboreamento, onde o teor de carvão vegetal influencia diretamente na resistência a frio.

O experimento de sinterização foi realizado com a altura da carga a 45 cm (no leito vertical) apenas diferenciando na concentração de moinha de carvão vegetal (15% e 20%) e ambos atingiram a expectativas, proporcionando a formação de um sínter de boa qualidade.

Os resultados das análises químicas e morfológicas revelaram que o sínter produzido no reator de leito fixo tem composição química e porosidade adequadas para serem utilizadas no processo de redução para obtenção do ferro gusa.

Entretanto o melhor sínter foi aquele produzido com 15% de teor de moinha de carvão vegetal, além de apresentar morfologia e características físico-químicas semelhantes ao do sínter com 20% de moinha de carvão vegetal, aquele demonstrou um menor índice de degradação por resistência mecânica comparando-o com o sínter com 20% de moinha de carvão vegetal, por ter apresentado maior fragilidade durante o ensaio de tamboreamento.

O sínter com 15% de MCV também demonstrou um alto índice de redutibilidade (RI), pois a menor taxa de carvão gera uma maior produtividade, diretamente influenciada pela maior porosidade, assim proporcionando maior rendimento da reação indireta de redução, removendo o oxigênio do óxido de ferro, produzindo pouco teor CO.

A temperatura de sinterização foi maior quando houve 20% de moinha de carvão vegetal na composição da carga a sinterizar, pois a quantidade de combustível implica na temperatura. Pois, quanto mais combustível, mais calor será liberado na reação de combustão.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Caracterização física do sinter produzido com moinha de carvão vegetal através de ensaios mecânicos.
- Avaliação do sinter produzido através do índice de porosidade.
- Estudo do sinter produzido com cinco teores distintos de moinha de carvão vegetal para uma melhor avaliação do sinter produzido a partir deste combustível.
- Comparar a reatividade da moinha de carvão vegetal e do coque levando em consideração a relação  $\text{CO}/\text{CO}_2$  dos gases no interior do leito para a produção de ambiente com menores temperaturas de sinterização.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, D. S. **Construção e simulação física do sinterizador piloto tipo Greenwalt**. Marabá. 96 f. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) - Instituto de Geociências e Engenharias – Faculdade de Engenharia de Materias, 2017.
- ARAÚJO, L. A; **Manual de siderurgia**. São Paulo: Arte & Ciência, 2005.v.11, Cap.4: Calcário. p. 97; 102-103. Cap. 7: Aglomeração de Minérios. p.175 – 190. Cap.9: Alto Forno a Carvão de Madeira. p. 259-263.
- ASSIS, C. F. C. **Caracterização de carvão vegetal para a sua injeção em altos-fornos a carvão vegetal de pequeno porte**. 125 f. 2008. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais. Ouro Preto, 2008.
- BARBIERI, C. C. T. **Estudo de Misturas de Carvões e Biomassa Visando a Combustão em Alto-Forno**. 120 f. 2013. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto ALEGRE, 2013.
- BERGMAN, T.L; LAVINE, A.S.; INCROPERA, F.P; DEWIT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2014. Cap.3: Condução Unidimensional em Regime Estacionário. P.76-77. Cap.7: Escoamento externo. p.305.
- CHEMALE, J.F; TAKEHARA, L. **Minério de ferro:geologia e geometalurgia**. Edgard Blucher, 2013. Cap.2: Gênese dos depósitos de minério de ferro. P.23. Cap.3: Geologia dos depósitos de minério de ferro. P.54-55. Cap.5: Preparação da amostra para estudos geometalúrgicos. P.160-161. Cap.6: caracterização do minério de ferro. p.169-175.
- DAWSON, P. R. **Part 2 - Research studies on sintering and sinter quality**. Iron making and Steel making, v. 20, n.2, p. 137-143, 1993.
- DNPM- Departamento Nacional de produção Mineral (1986) **Principais Depósitos Minerais do Brasil –vol2**. São Paulo. Companhia do vale do Rio Doce, 1986. Cap.1: Geologia do Ferro. P.3-6. Cap.3: Depósito de Ferro da serra de Carajás, Pará. p.29;60.
- DNPM - Departamento Nacional de produção Mineral. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais substâncias metálicas**. Brasília: DNPM, 2016. p . 3
- INFOMET. **Aços e ligas – aço processo de fabricação: processo Siderúrgico**. Disponível em: < <http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=232>>Acessoem: 18 mar. 2018.
- FAN, X.; JI, Z.; GAN, M.; CHEN, X.; LI, Q.; JIANG, T. **Influence of charcoal replacing coke on microstructure and reduction properties of iron ore sinter**. China, Institute of Materials, Minerals and Mining. Artigo – School of Minerals Processing & Bioengineering, Central South University, 2016.

LOPES, M. V. **Caracterização de Sínter de Minério de Ferro para Uso em Altos-Fornos a Carvão Vegetal**. 120 f. 2012. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2012.p.11,13,25-26.

NEVES, A. S. S. et al. **Caracterização Física e Química da carepa de laminação para estudo em sinterização**. Belém. UFPA- Universidade Federal do Pará. 56º Congresso brasileiro de Química, 2016.

PINHEIRO, P. C. C. et al. **A produção de carvão vegetal: teoria e prática**. Belo Horizonte, 2006.

SANTOS, S.F.O. et al. **Processo sustentável de produção de carvão vegetal quanto aos aspectos: ambiental, econômico, social e cultural**. Curitiba. UTFPR, 2012.

STARLING., A.R.A.R. **Avaliação de metodologias de simulação física do processo de sinterização**.162 f. 2012. Dissertação (Mestrado) - Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo horizonte. 2012. P. 12, 52.

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. p.74.