

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

**ADAILSON DA SILVA DUARTE**

**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE SÍNTER  
UTILIZANDO RESÍDUOS SIDERÚRGICOS COM FOCO NA  
RESISTÊNCIA MECÂNICA**

**VOLTA REDONDA – RJ**

**2016**

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

**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE SÍNTER  
UTILIZANDO RESÍDUOS SIDERÚRGICOS COM FOCO NA  
RESISTÊNCIA MECÂNICA**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, sob a orientação do Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe, na área de concentração de Processamento e Caracterização de Materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos, linha de pesquisa Materiais Metálicos.

**Aluno:** Adailson da Silva Duarte

**Orientador:** Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

**VOLTA REDONDA – RJ**

**2016**

### **FICHA CATALOGRÁFICA**

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

D812s Duarte, Adailson da Silva.  
Síntese e caracterização de sínter utilizando resíduos siderúrgicos com foco na resistência mecânica. / Adailson da Silva Duarte. - Volta Redonda: UniFOA, 2016.

96 p. : Il

Orientador(a): Profº. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2016

1. Materiais - dissertação. 2. Resíduos siderúrgicos. 3. Sínter. 4. Resistência mecânica. I. Habibe, Alexandre Fernandes. II. Centro Universitário de Volta Redonda. III. Título.

CDD – 620.1

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Aluno: Adailson da Silva Duarte**

**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE SÍNTER UTILIZANDO RESÍDUOS  
SIDERÚRGICOS COM FOCO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA**

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Banca Examinadora



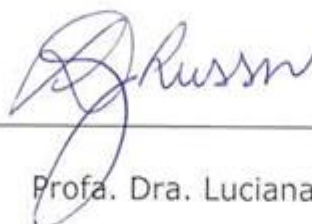
---

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe



---

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira



---

Profa. Dra. Luciana Ghussn

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus nosso pai celestial e aos meus pais. Em particular a minha sogra Lúcia e a minha esposa Karla por sempre estarem ao meu lado. Ao meu Orientador Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe, pela paciência e pelos ensinamentos que foram de suma importância à concretização desse trabalho. Ao coordenador do curso o Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago e a secretária Ana Maria pela atenção e disposição em ajudar. Por fim agradeço a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização desse sonho.

**DUARTE, A. S. Síntese e caracterização de sínter utilizando resíduos siderúrgicos com foco na resistência mecânica.** 2016. 96 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda - UniFOA, Volta Redonda-RJ.

## **RESUMO**

A legislação brasileira estabelece que é de responsabilidade da empresa geradora a disposição final de todos os resíduos gerados em um processo industrial. A seleção do método mais apropriado para a destinação dos resíduos, normalmente, leva em consideração fatores econômicos e tecnológicos conforme exige a legislação. O objetivo do trabalho foi a utilização de resíduos sólidos que antes seriam descartados no meio ambiente, reutiliza-los em forma de sínter para aplicação em alto-forno na produção do aço. O foco do trabalho residiu na caracterização da resistência mecânica do coproduto com o objetivo de avaliar a degradação do material ao longo do processo e na determinação da resistência à queda. Os resíduos sólidos utilizados foram: lama de aciaria, pó misto, carepa, sínter de retorno, moinha de coque e pó de cal, dentre outros. O sínter apresentou uma granulometria variando de 15 a 35 mm e uma adequada resistência ao impacto e a queda, com índices acima da média exigida pela norma, fatores esses que aumentam o interesse comercial da utilização do sínter de resíduos siderúrgicos como matéria prima na produção de aço. A interpretação das normas ABNT NBR 10633 e a ABNT NBR ISO 3271 foram de suma importância na aplicação do Tumbler e do Shatter Test para avaliação da qualidade do sínter produzido e na elaboração de um folder ilustrativo em forma de guia simplificado dos procedimentos para a realização dos testes de forma simples, prática e objetiva.

**Palavras-chave:** resíduos siderúrgicos, sínter, resistência mecânica.

DUARTE, A. S. **Synthesis and characterization of sinter using steel residues focusing on mechanical resistance**. 2016. 96 f. Dissertation (Professional Master in Materials) - Oswaldo Aranha Foundation, University Center of Volta Redonda - UniFOA, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brazil.

### **ABSTRACT**

Brazilian legislation establishes that the dispose of all waste generated in an industrial process is responsibility of the generator company. The selection of the most appropriate method for the destination of waste usually takes into account economic and technological factors as required by legislation. The goal of this work was the use of solid waste that would previously be disposed in the environment, reusing them as sinter for blast furnace application in steel production. The focus of this work was the characterization of the mechanical resistance of the co-product in order to evaluate the degradation of the material along the process and the determination of the resistance to fall. The solid residues used were: steel slurry, mixed powder, scale, return sinter, coke grinder and lime powder, among others. The sinter presented granulometry varying from 15 to 35 mm and adequate resistance to impact and fall, with indices above the average required by the standard, factors that increase the commercial interest of the use of the sinter of steel residues as raw material in the production of steel. The interpretation of the standards ABNT NBR 10633 and ABNT NBR ISO 3271 were of great importance in the application of Tumbler and Shatter Test to evaluate the quality of the sinter produced and in the elaboration of an illustrative folder in the form of a simplified guide of the procedures for the accomplishment of the testing in a simple, practical and objective manner.

**Keywords:** steel residues, sinter, mechanical resistance.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1. Objetivo .....	13
1.2. Justificativa .....	14
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1. A siderurgia .....	15
2.2. Resíduos sólidos siderúrgicos .....	22
2.3. Utilização de coprodutos .....	26
2.4. Destinação dos resíduos siderúrgicos .....	28
2.5. Resíduos siderúrgicos e o meio ambiente .....	29
2.6. Gestão de Resíduos Sólidos Siderúrgicos .....	31
2.7. Processos de aglomeração .....	33
2.7.1. Processo de Briquetagem .....	34
2.7.2. Processo de Pelotização .....	36
2.7.3. Processo de Sinterização .....	39
2.7.3.1. A importância dos Fundentes na Sinterização .....	47
2.7.3.2. Combustíveis para Sinterização .....	48
2.7.3.3. Qualidade do Sínter .....	50
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>55</b>
3.1. Materiais .....	55
3.2. Métodos.....	57
3.2.1. Sinterização.....	58
3.2.1.1. Local e Equipamento .....	58
3.2.1.2. Sistema de Dosagem.....	61
3.2.1.3. Mistura e Aglomeração .....	61
3.2.2. Caracterização Mecânica do Sínter Produzido .....	62
3.2.2.1. Shatter Test .....	62
3.2.2.2. Tumbler Test.....	66
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>71</b>
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>82</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>83</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>84</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Setores consumidores de aço.....	17
Figura 2: Fluxograma simplificado da produção do aço .....	18
Figura 3: Usina integrada .....	19
Figura 4: Usina semi-integrada .....	20
Figura 5: Produtores independentes de ferro gusa em Minas Gerais. ....	21
Figura 6: Obtenção do aço - Diagrama de blocos .....	24
Figura 7: Gestão de resíduos siderúrgicos - Fluxograma.....	33
Figura 8: Briquetagem por compressão em prensa de rolos.....	35
Figura 9: Disco de Pelotamento .....	37
Figura 10: Mecanismo de formação da pelota. ....	38
Figura 11: Esquema simplificado do processo de sinterização. ....	39
Figura 12: Processo de Sinterização.....	40
Figura 13: Fluxograma do processo de sinterização.....	41
Figura 14: Sistema de sinterização contínua tipo Dwight–Lloyd. ....	42
Figura 15: Movimento da frente de combustão .....	43
Figura 16: Esquema da máquina de sinterização intermitente demonstrando avanço e temperatura da frente de combustão.....	45
Figura 17: Corte longitudinal do leito da máquina de sinterização contínua.....	46
Figura 18: Corte transversal do leito de uma máquina de sinterização contínua. ....	46
Figura 19: Esquema do Tumbler Test. ....	52
Figura 20: Esquema do Shatter Test.....	54
Figura 21: Fluxograma dos métodos utilizados. ....	57
Figura 22: Sinterização contínua da Tecnosulfur. ....	58
Figura 23: Esteira de Sinterização .....	59
Figura 24: Representação do processo de sinterização. ....	60
Figura 25: Características do aparelho utilizado no Shatter Test. ....	63
Figura 26: Aparelho utilizado no ensaio de queda. ....	64
Figura 27: Esquema para a realização do Shatter Test .....	65
Figura 28: Características do aparelho utilizado no Tumbler Test. ....	67
Figura 29: Aparelho utilizado no ensaio de tamboramento. ....	68
Figura 30: Esquema para a realização do Tumbler Test.....	69

Figura 31: Representação gráfica do volume de resíduos sólidos gerados mensalmente na usina integrada com teor de ferro. ....	71
Figura 32: Média da temperatura da mistura durante a sinterização. ....	72
Figura 33: Características do sinter produzido.....	73
Figura 34: Avaliação da resistência mecânica do Sinter no 1° e 2° ensaio – Shatter Test .....	74
Figura 35: Avaliação da resistência mecânica do Sinter no 1° e 2° ensaio – Tumbler Test .....	76
Figura 36: Qualidade do Sinter produzido– Shatter Test .....	77
Figura 37: Qualidade do Sinter produzido – Tumbler Test.....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades físicas e químicas do síter.....	50
Tabela 2: Volume de resíduos gerados na cadeia produtiva de uma usina integrada. .....	55
Tabela 3: Composição química da matéria prima utilizada na sinterização .....	56
Tabela 4: Proporções da mistura utilizada na sinterização .....	56

## **LISTA DE SIGLAS**

ABIPTI – Associação Brasileira das Instituições de Pesquisa Tecnológica e Inovação

ABM - Associação Brasileira de Materiais

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CCABrasil - Centro de Coprodutos Aço Brasil

CETEM - Centro de Tecnologia Mineral

CNI - Confederação Nacional da Indústria

CSN - Companhia Siderúrgica Nacional

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

FIRJAN - Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro

IAB - Instituto Aço Brasil

IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia

ISO - "International Organization for Standardization" (Organização Internacional para Padronização)

NBR - Norma Brasileira

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

SGA - Sistema de Gestão Ambiental

SINDIFER - Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Guia simplificado dos procedimentos para a realização do Tumbler Test. Elaborado pelo autor com base na norma ABNT NBR ISO 3271. ....	95
Anexo 2: Guia simplificado dos procedimentos para a realização do Shatter Test. Elaborado pelo autor com base na norma ABNT NBR 10633.....	96

## **1. INTRODUÇÃO**

Sustentabilidade, considerando suas várias dimensões, para a indústria é uma questão essencial que implica em aliar desenvolvimento econômico à preservação ambiental e à responsabilidade social. Pois a legislação brasileira vigente, concernente ao meio ambiente, estabelece que a disposição final de todos os resíduos gerados durante um processo industrial é de responsabilidade da empresa geradora.

Diante desse pressuposto entende-se que o gerenciamento desses resíduos por parte das empresas é de extrema importância na atual conjuntura, pois a grande quantidade de resíduos siderúrgicos gerados trazem inúmeros problemas para o meio ambiente e para sociedade em geral. E uma das maiores preocupações é a redução dos impactos ambientais por meio de iniciativas que alcancem a competitividade aliada à sustentabilidade visando o incremento da produtividade com a máxima redução do consumo dos recursos naturais e eliminação de danos ambientais.

Dessa forma, inúmeros trabalhos de pesquisa com foco em agregar valor aos resíduos sólidos vêm em busca de tecnologias e conceitos aplicáveis cada vez mais eficientes. Afinal as empresas sofrem pressões na mitigação da geração dos resíduos, assim como no reaproveitamento para redução do impacto ambiental, portanto, reduzindo as disposições em aterros. Uma das alternativas encontradas é baseada em princípios de inovação em processos de aglomeração e produtos com modelos gerados a partir de menores impactos ambientais, promovendo a eficiência no uso de recursos e na gestão adequada dos resíduos sólidos.

### **1.1. Objetivo**

O presente estudo tem como objetivo a utilização de resíduos sólidos, originados no processo siderúrgico básico, em processos siderúrgicos primários por meio do coproduto resultando em sínter para aplicação na produção de aço. O foco do trabalho reside na caracterização da resistência mecânica do sínter por meio dos testes de Tumbler e Shatter. Busca-se caracterizar e verificar características ligadas

à integridade do produto gerado, ou seja, avaliação da geração de finos em testes e a consolidação das características de sinterabilidade. Para tal foi necessário a interpretação das normas ABNT NBR 10633 e a ABNT NBR ISO 3271, que resultou na elaboração de um folder ilustrativo em forma de guia simplificado dos procedimentos para a realização dos testes.

## **1.2. Justificativa**

O processo siderúrgico gera como produto o aço, mas ao mesmo tempo gera um grande volume de resíduos. Entende-se que sustentabilidade é uma questão fundamental no que tange o desenvolvimento econômico, preservação ambiental e a responsabilidade social. Dessa forma o propósito do estudo é a avaliação da síntese do produto sinter a partir de resíduos sólidos siderúrgicos considerando suas características de resistência mecânica, gerando alternativas para a gestão e utilização interna de resíduos, redução do consumo de recursos naturais com o desenvolvimento de coprodutos e aperfeiçoamento do processo de reciclagem por meio da sinterização. Percebeu-se também a necessidade de criar um guia simplificado dos procedimentos para a realização dos testes utilizados nesse trabalho para a caracterização da resistência mecânica do sinter com o objetivo de nortear os profissionais que lidam diretamente com a aplicação dos testes em questão, visto que as normas direcionadas aos procedimentos não são de fácil interpretação e que até pouco tempo os procedimentos eram realizados sem normalizações, na maneira mais artesanal possível.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. A siderurgia

De acordo com SILVA (2011), a Metalurgia é a ciência e a tecnologia que extrai metais a partir de seus minérios com o objetivo de utilizar industrialmente. Quando se trata especificamente da metalurgia do ferro chamamos de siderurgia. Dessa forma entende-se que a siderurgia é o ramo da metalurgia que utiliza o conjunto de técnicas e conceitos abrangentes a extração, purificação, e modificação de metais ferrosos aplicados aos processos industriais de obtenção e tratamento de aços.

Segundo NOLDIN Jr (2002) o radical da palavra siderurgia vem do latim *sider* que significa estrela ou astro. E a primeira vez que o homem fez contato com elemento ferro, foi sob a forma de meteoritos. Com a invenção de fornos foi possível a correção de impurezas além da adição de propriedades como resistência ao desgaste, ao impacto, à corrosão, entre outros. O aço passou a representar cerca de 90% de todos os metais consumidos pela civilização industrial devido as suas propriedades e seu baixo custo.

Segundo a ABNT NBR 6215:2011, o aço é constituído por ligas de ferro com pequenos teores de carbono, entre 0,008% e 2%. Podendo conter ainda outros elementos de liga adicionados propositalmente para alterar suas propriedades. Os aços possuem menos de 2% de carbono em sua composição, isso lhes dão propriedades como: adequada resistência mecânica, possibilidade de ser forjado, laminado, moldado, perfurado e modificado em suas propriedades por meio de tratamentos térmicos, mecânicos e químicos. (ARAÚJO, 1997)

Silva (2011), explica que o ferro ocorre na natureza sob diversas formas de minerais, mas apenas algumas dessas fontes têm valor comercial. O autor afirma ainda que os diversos minerais formados por óxidos de ferro representam a grande maioria das fontes de ferro para a indústria siderúrgica sendo eles:

- A Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) que corresponde a aproximadamente 72% de ferro e 28% de oxigênio em massa, tem a coloração cinza escura a preta, densidade



de  $5,16 \text{ g/cm}^3$ , altamente magnética e permite facilmente a exclusão de resíduos indesejáveis do minério, sendo minerada principalmente na Suécia.

- A Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) com sua composição aproximada de 70% de ferro e 30% de oxigênio em massa, sua cor varia de cinzenta à avermelhada, com densidade de  $5,26 \text{ g/cm}^3$ , sendo o minério de maior emprego na siderurgia e as maiores jazidas brasileiras estão localizadas em Carajás no estado do Pará.

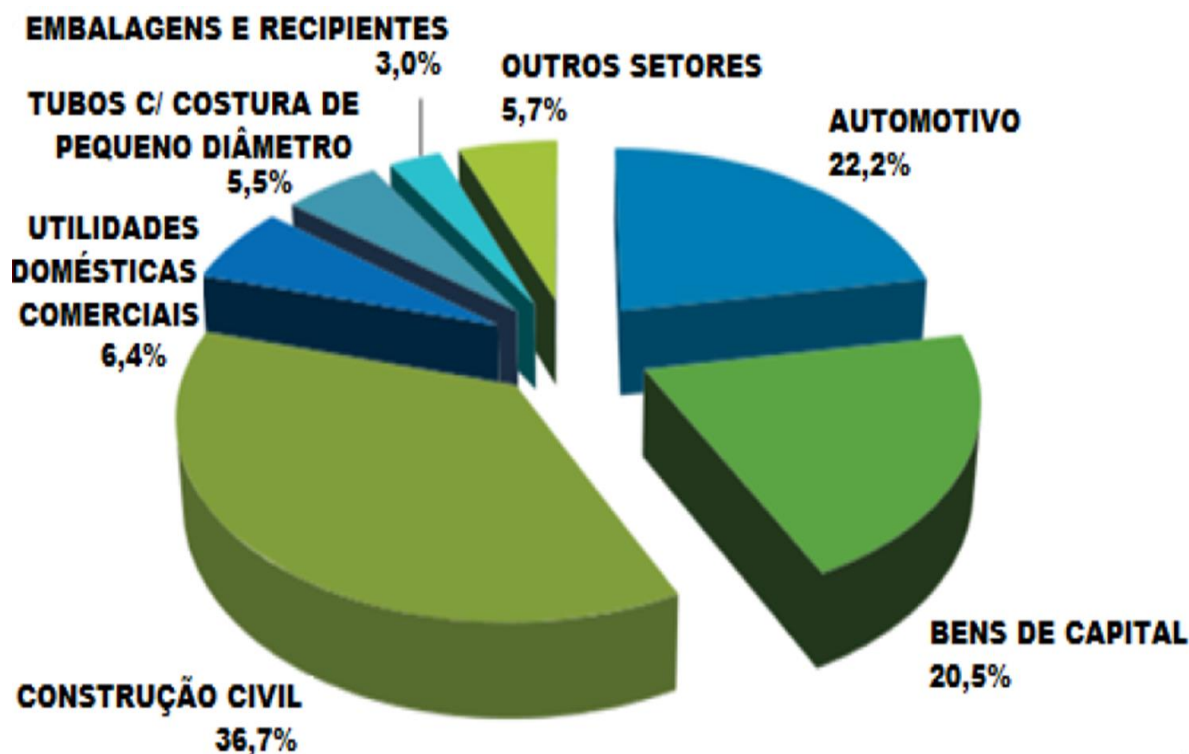
A matéria-prima mais importante para a produção do aço é o minério de ferro, tanto em quantidade, quanto em custo. No cenário mundial apenas a Índia e a Rússia podem equiparar-se ao nosso país, o que para o Brasil é significativamente vantajoso, pois possui uma das maiores reservas de minério de ferro do mundo com uma quantidade correspondente a um total acima de 49 bilhões de toneladas.

Segundo USIMINAS (2001), para que o aço incorpore propriedades especiais tais como tenacidade e resistência à corrosão, é necessária a adição de outras substâncias tais como; manganês, silício, cromo e níquel. Além disso, várias operações especiais como laminação, tratamento térmico, resfriamento, forjamento, dentre outras, também modificam as propriedades do aço, tais como frágil e dúctil.

FERRAZ (2003), explica que de maneira geral, os aços possuem excelentes propriedades mecânicas; resistem bem à tração, à compressão, à flexão, e como é um material homogêneo, pode ser laminado, forjado, estampado, estriado e suas propriedades podem ainda ser modificadas por tratamentos químicos, sendo por isso considerado o mais versátil dos metais.

As utilizações do aço no mercado brasileiro e no mercado internacional em diversas aplicações e setores são justificadas devido as suas excelentes propriedades mecânicas, na figura 1 podemos observar exemplos da utilização e seus devidos percentuais em cada setor. Podemos citar ainda, como exemplo dos principais setores consumidores; construção civil, automotivo e bens de capital.

Figura 1: Setores consumidores de aço.



Fonte: National Geographic Production, 2006.

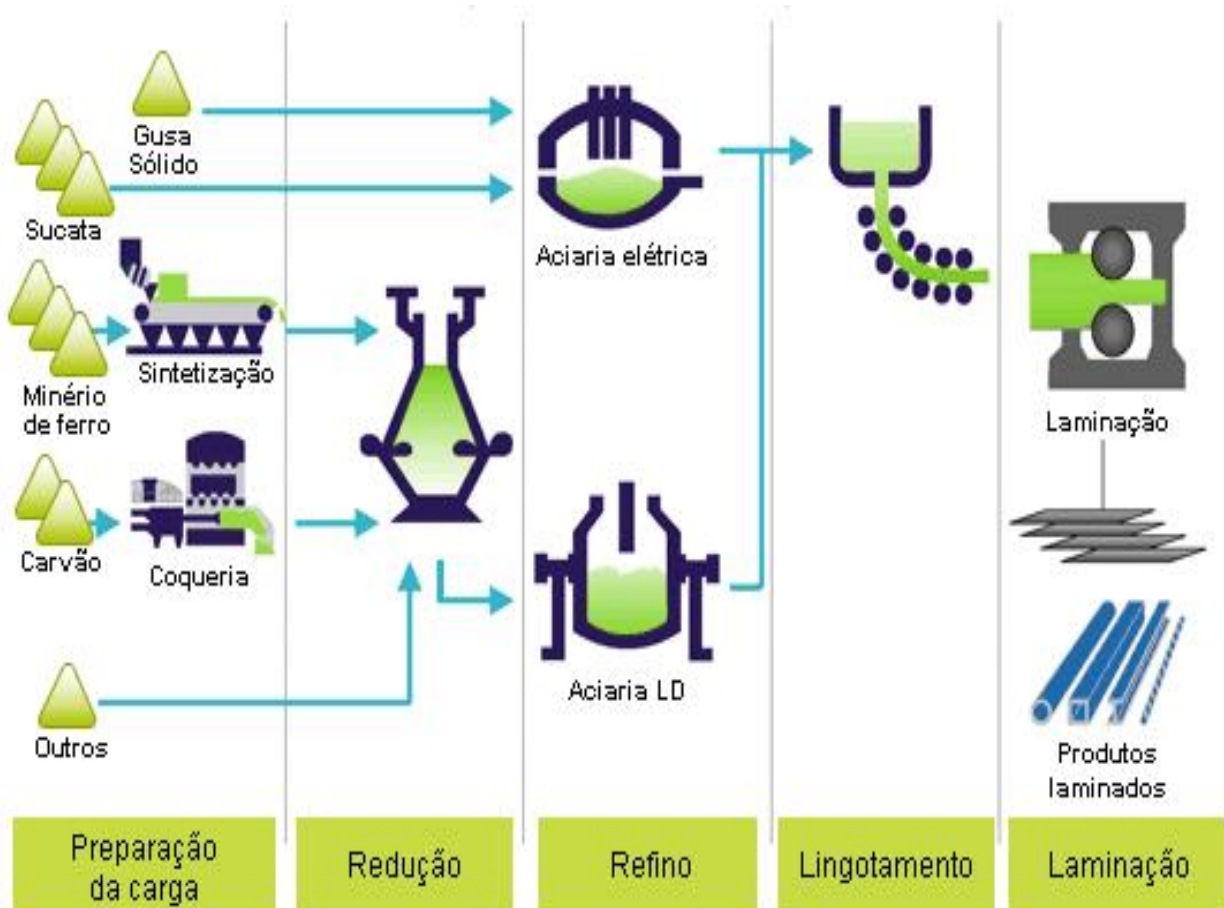
O princípio de obtenção do aço para o posterior consumo por parte desses consumidores consiste na combinação de processos químicos e termomecânicos para a extração e o tratamento do ferro. Esse procedimento pode ocorrer tanto em usinas integradas quanto em semi-integradas, que se diferenciam pelas técnicas de produção aplicadas. (MOURÃO, 2011; IAB, 2014)

Segundo o Instituto Aço Brasil (2015) a fabricação do aço pode ser dividida em quatro principais etapas: preparação da carga, redução, refino e laminação. O processo siderúrgico contempla em sua maioria três tipos de usinas siderúrgicas e são classificadas segundo o seu processo produtivo em: integradas, semi-integradas e não integradas.

De acordo com MOURÃO (2011) a primeira parte do fluxograma da figura 2 é identificada como preparação da carga, na qual o minério de ferro sofre um processo de aglomeração denominado sinterização e pelletização que resultará em uma granulometria que possibilite seu carregamento no alto-forno.

Esta etapa contempla ainda a conversão do carvão mineral em coque através da eliminação dos compostos voláteis presentes e que são indesejáveis ao processo, aumentando assim a eficiência deste redutor no alto-forno.

Figura 2: Fluxograma simplificado da produção do aço



Fonte: Instituto Aço Brasil, 2015.

PINHO & LOPES (2000) explicam que no processo produtivo integrado temos três fases distintas onde:

- A primeira é denominada redução, e seu objetivo principal é a transformação do minério de ferro em ferro-gusa, que é geralmente encontrado na natureza na forma de óxido de ferro. Onde ocorre a extração do ferro de seu minério através de processos em alto fornos.
- Na segunda fase, conhecida como refino, ocorre a produção do aço propriamente dito e a sua solidificação nas aciarias. O ferro-gusa é

transformado em aço nas aciarias LD - Linz-Donawitz ou a oxigênio, através da diminuição do teor de carbono e demais impurezas.

- Após a fabricação do aço, ocorre a terceira etapa onde são realizados o lingotamento e a laminação, que consistem na conformação do metal no produto final, como podemos observar na figura 3.

Figura 3: Usina integrada



Fonte: Adaptado de GEGENHEIMER, 2007; GERDAU, 2011.

As usinas integradas são empresas de grande porte que utilizam como matéria-prima o minério de ferro e possuem três principais etapas para a obtenção do aço, tais como: Redução, Refino e Conformação Mecânica.

Como exemplos de usinas brasileiras nesse seguimento podemos citar; a CSN localizada em Volta Redonda-RJ, Gerdau localizada em Ouro Branco e a Usiminas localizada em Ipatinga e Cubatão.

Por outro lado, o processo semi-integrado como podemos observar na figura 4 acontece somente a partir da segunda etapa, onde temos o refino, ou seja, a transformação do ferro-gusa ou ferro-esponja em aço, e a conformação do metal em produto final.

O processo semi-integrado usa como principal matéria-prima a sucata de aço, reciclando este material em fornos elétricos a arco, também chamados de aciarias elétricas. (MOURÃO, 2011; IAB, 2014)

Figura 4: Usina semi-integrada



Fonte: Adaptado de GEGENHEIMER, 2007; GERDAU, 2011.

Como exemplo de usinas semi-integradas atuante no segmento podemos citar a Votorantim Siderurgia localizada em Barra Mansa e Resende.

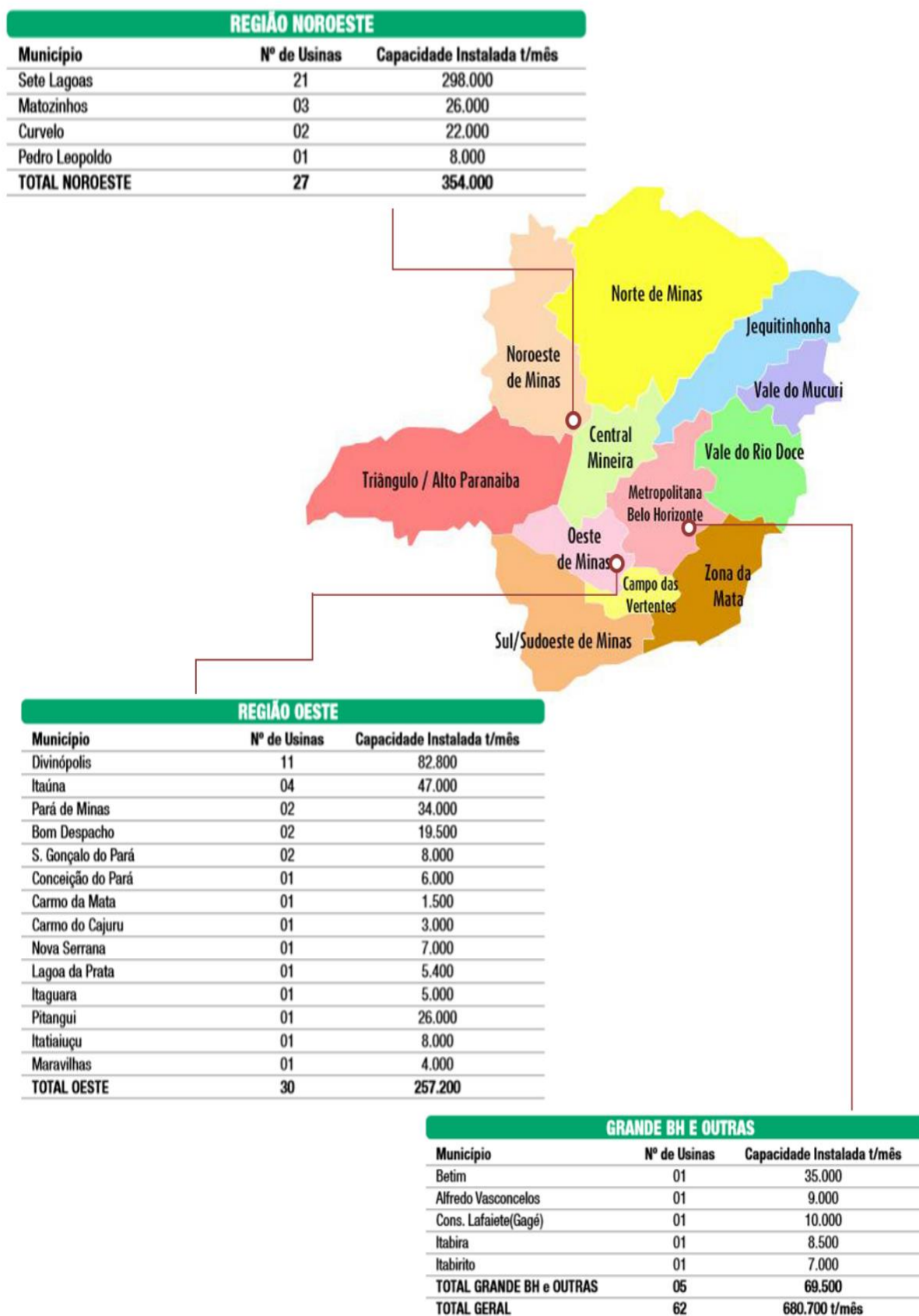
Já as usinas não integradas operam apenas em uma fase do processo, como a redução do minério de ferro para obtenção de ferro gusa em usinas. Essas usinas normalmente no Brasil estão localizadas no parque mineiro em Minas Gerais - MG e são mercadologicamente denominadas “guseiros”.

A SINDIFER informa que o mercado em Minas Gerais atingiu 2,9 milhões de toneladas de produção independente de ferro gusa correspondendo a 57% da produção brasileira.

A distribuição dos produtores independentes de ferro gusa no parque mineiro pode ser observada na figura 5 abaixo, o que nos remete a importância da produção do ferro gusa para o nosso país, pois economicamente falando movimenta milhões.



Figura 5: Produtores independentes de ferro gusa em Minas Gerais.



Fonte: Adaptado de SINDIFER, 2014.

## **2.2. Resíduos sólidos siderúrgicos**

Segundo MACHADO (2005), os resíduos são gerados em todos os processos da indústria siderúrgica independente do tipo de atuação, ocasionando a geração de um enorme volume de resíduos. E as características de cada resíduo irá depender da composição química da matéria-prima, tais como; minério de ferro, carvão, calcário ou cal que são utilizadas no processo de fabricação dos produtos. (NASCIMENTO, 2005)

E de acordo com BARROS (2002), a geração desse grande volume de resíduos sólidos está ligado à produção industrial de bens de consumo e intimamente ligado ao crescimento populacional em todos os países. Pois a cada tonelada de aço produzido as usinas integradas geram cerca de 450 kg de resíduos sólidos, e caso não fossem reaproveitados, eles provavelmente inviabilizariam a produção de aço em razão de fatores econômicos e ambientais.

Então a solução é o correto gerenciamento desses resíduos e conforme são gerenciados, principalmente os resíduos sólidos gerados pela atividade siderúrgica podem ser classificados como subprodutos ou mesmo coprodutos da fabricação do aço e podem ter basicamente três destinos; o descarte, o reaproveitamento interno ou o reaproveitamento externo.

Partindo desse pressuposto, entende-se que aliar crescimento econômico com uma produção limpa é um dos grandes desafios do setor. Pois o descarte puro e simples de resíduos tem sido cada vez mais desestimulado, principalmente devido às normas cada vez mais rígidas quanto à qualidade dos aterros.

Já a reciclagem tem sido apontada como a solução mais interessante para os problemas dos resíduos industriais, pois é o principal componente para a realização de um desenvolvimento autossustentável, já que o aumento da produção de aço provoca um conseqüente aumento da produção de resíduos. Empresas que não desenvolvem formas de reciclar estes resíduos acabam destinando-os à deposição, criando um sério problema ambiental. (BUTLER & HOOPER, 2005)

Algo que não é aceitável nos dias atuais, pois nos últimos anos pesquisas sobre a reciclagem de resíduos industriais vem sendo intensificada em todo o

mundo. De acordo com TAKANO et al, (2000), muitas empresas investem em pesquisa e tecnologia para reaproveitamento de rejeitos industriais, o que aumenta a qualidade do produto reciclado e propicia maior eficiência do sistema produtivo.

Conforme a ABIPTI (2001), a reciclagem e a utilização parcial ou total de rejeitos constituem vantagens que colocam o fabricante em uma posição fortemente competitiva no mercado, devido não só à questão econômica, como também à oportunidade de veiculação deste princípio com a sua empresa, como forma de marketing em relação ao aspecto ecológico e ambiental.

Pois cerca de 450 kg de “coprodutos e resíduos” são originados a cada tonelada de aço produzida segundo as estimativas do Instituto Aço Brasil. Este valor está relacionado à rota tecnológica empregada e já chegou a superar a marca de 700 kg (IBS, 2007). Deste montante, 80% em média são reciclados ou reutilizados seja no ciclo do aço ou em outros processos.

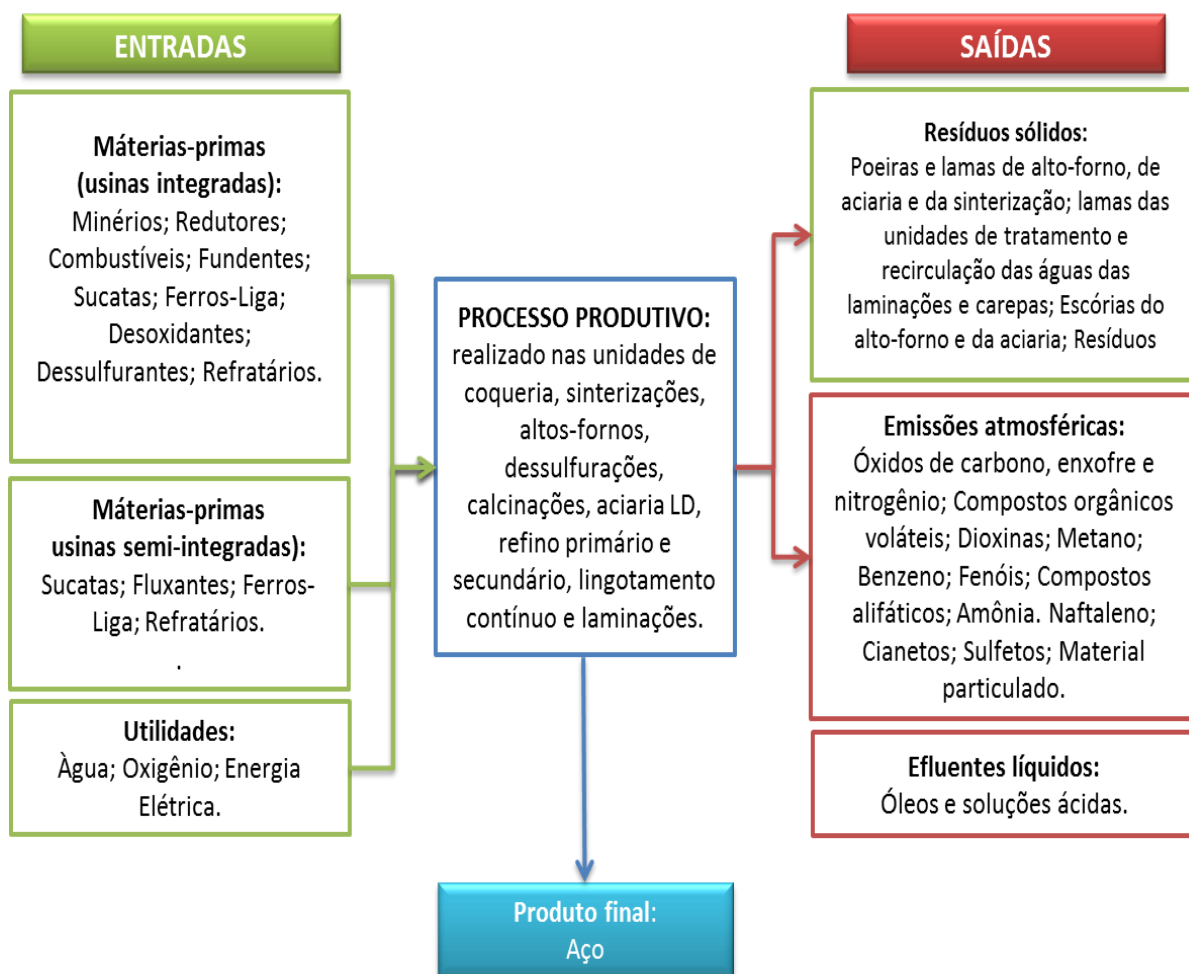
Neste contexto, baseando-se nos conceitos previstos na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) considera-se por reciclagem: O processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos os novos produtos. Da mesma forma, a reutilização é descrita como o processo de aproveitamento dos resíduos sólidos sem sua transformação biológica, física ou físico-química. (BRASIL, 2010).

Segundo MOURÃO (2011), a composição entre os resíduos varia muito em função dos procedimentos e características das matérias-primas utilizadas. A Figura 6 apresenta um diagrama de blocos com as principais entradas e saídas do processo de obtenção do aço de ambas as rotas tecnológicas atualmente empregadas, onde podemos observar que dentre as classes de resíduos presentes no diagrama, os sólidos são os que apresentam maior potencial para a reutilização e reciclagem, em especial aqueles que possuem teor de ferro em sua composição, tais como; escórias, lamas, poeiras/pós e carepa.

A seguir explana-se um pouco mais sobre cada um desses resíduos que são o foco do presente trabalho, onde busca-se a reutilização desses resíduos que antes poderiam ser descartados no meio ambiente.



Figura 6: Obtenção do aço - Diagrama de blocos



Fonte: Adaptado de MOURÃO, 2011.

A escória, proveniente dos fornos de redução e refino, é composta por impurezas do minério de ferro/ferro gusa, sucatas, adições e reações ocorridas nos banhos líquidos, como os óxidos e silicatos, e constitui o resíduo de maior volume - cerca de 70% (LOBATO, 2014; IBS, 2007; IAB, 2014). Segundo ALMEIDA & MELO (2001), a classificação dessa escória conforme a norma brasileira NBR 10004 (ABNT, 2004) varia entre a classe IIB - não perigoso e inerte, e a classe IIA - não perigoso e não inerte, considerando o teor de alumínio presente.

Segundo ROCHA & FUINHAS, (1991) as escórias de siderurgia são materiais resultantes da produção de ferro gusa em alto forno e de aço em aciaria. Abaixo podemos observar as principais características de cada tipo de escória.

Escória de alto forno é originada na produção do ferro gusa nos altos fornos e produzida normalmente de 600 a 700 kg/t de gusa, tendo sua utilização crescente na indústria cimenteira substituindo o clínquer e reduzindo a emissão de CO<sub>2</sub> e recurso natural pelas jazidas de calcário. Já a escória de aciaria é oriunda do processo de refino do aço com geração aproximada de 100 a 150kg/t de aço líquido, são aplicadas como subproduto principalmente em capas asfálticas de pavimento rodoviário, nivelamento de terreno e contenção de encosta, corretivos e fertilizante fosfatados para solos e produção de cimento e concreto.

Dessa forma de acordo com BOSI FILHO (1991), a escória de aciaria difere quimicamente da escória de alto forno principalmente no que diz respeito ao teor de ferro contido e à basicidade binária, ou seja, devido à relação percentual entre óxido de cálcio e sílica. Assim, as escórias de aciaria apresentam maior dureza e densidade devido à presença de maiores teores de óxidos de ferro.

Quando trata-se das lamas LOBATO (2014), afirma que representam cerca de 5% dos resíduos, elas provem do tratamento dos gases por via úmida e são formadas por óxidos de ferro, cálcio, silício, manganês e alumínio. A classificação varia entre classe I – perigoso e classe IIA – não perigoso e não inerte, devido à possível presença de elementos tóxicos como cádmio, zinco, chumbo e arsênio (MANSFELDT, DOHRMANN, 2004; ABNT, 2004).

A lama é formada pela remoção do pó no gás através de seu tratamento nos lavadores com fundo cônico, podendo atingir 30 a 50% na coleta de sedimentos sólidos. Ela é encaminhada para o sistema de filtragem e enviada para sinterização com 25% de umidade. Quando o tratamento dos gases de processo ocorre por via seca, originam-se os pós, cuja geração alcança quase 15% do total de resíduos sólidos.

De acordo com MACHADO (2006), o pó de alto forno e coqueria são ricos em carbono (C) minimizando o consumo de combustível na sinterização. Os pós são divididos em pó do alto-forno e pó de aciaria elétrica, ambos são agrupados como classe I - perigoso. O pó do alto-forno é composto principalmente de óxidos metálicos e materiais carbonosos, já o pó de aciaria elétrica contém grande

quantidade de metais como; zinco, cromo, cádmio e chumbo. (JACOMINO et al., 2002)

Por fim, outro resíduo comum ao processo é a carepa, derivada da oxidação da superfície do aço nas etapas finais de lingotamento e laminação. São oriundos de óxido de ferro da laminação a quente, forjamento, tratamentos térmicos, entre outros correspondendo a 20% dos resíduos contendo ferro. Normalmente apresenta um teor de FeO em torno de 60% e favorece a redução do coque quando adicionada na pilha na sinterização. Sua composição se resume à presença de óxidos de ferro, bem como uma grande quantidade de óleo; logo, corresponde à classe I - perigoso, de acordo com a NBR 10004 (ALMEIDA, 2009; MARTÍN, LÓPEZ, TORRALBA, 2012; CUNHA et al., 2006; ABNT, 2004).

Após conhecer um pouco mais sobre cada tipo de resíduo sólido, observa-se que de acordo com CCABrasil (Centro de Coprodutos Aço Brasil), os coprodutos formados a partir de resíduos sólidos utilizados na indústria do aço garantem vários benefícios ambientais, dentre eles:

- Minimização do consumo de recursos naturais não renováveis da mineração de minério de ferro, areia e outros materiais primários e;
- Alteração do passivo na forma de agentes impactantes ao meio ambiente, em ativo ambiental reduzindo a destinação em aterros e obras de infraestrutura.

### **2.3. Utilização de coprodutos**

De acordo com PÉRET et al. (2008), a sobra de um processo ineficiente com perda de material, energia e altos custos, aliados com materiais destinados a aterros após a produção do aço, estão condicionados a serem chamados de resíduos sólidos. Alguns dos resíduos sólidos decorrentes da produção do aço devido à possibilidade de valorização comercial estão sendo denominados de coprodutos. Dessa maneira, quando reprocessados para serem novamente aplicados nos processos siderúrgicos, os resíduos sólidos antes descartados são reutilizados.

O Instituto Aço Brasil (2015), afirma que o setor siderúrgico brasileiro está posicionado em 9º maior produtor mundial e que em 2014 foi responsável pela produção de 33,9 milhões de toneladas de aço bruto no país, além 22 milhões de toneladas de coprodutos.

O instituto aponta a possibilidade da utilização de resíduos siderúrgicos na fabricação de cimentos, pavimentação, dentre outras aplicações. A intenção principal é a estimular ações para a “qualificação técnica e a agregação de valor aos coprodutos”. Em 2015 foi publicada uma norma brasileira que trata especificamente da aplicação de agregado siderúrgico como sub-base e base. A técnica já tem sido utilizada em parceria com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) em alguns trechos experimentais. (IAB, 2015)

Para o desenvolvimento de tecnologias de reciclagem e reutilização que sejam técnica e economicamente viáveis, o setor contribui com estudos em parceria com instituições de ensino e pesquisa.

No entanto, segundo IBS (2007), o incentivo por parte dos órgãos ambientais é um fator primordial, pois é através dele que será criadas condições que possibilitem um tratamento entre materiais, ainda que o resíduo apresente periculosidade inferior à matéria-prima já consolidada no mercado.

Quando adequadamente tratados os resíduos siderúrgicos tais como: pós de sinterização, escórias, lamas da mineração, lamas de aciaria, coqueria, calcinação, carepas e outros resíduos da siderúrgica estão sendo economicamente reaproveitados. Pois a preservação do meio ambiente e imagem positiva perante a sociedade, entre outros motivos, têm levado a siderurgia a uma gestão ambiental responsável, com uma política sustentável em relação aos coprodutos.

De acordo com a FIRJAN, considerando o setor brasileiro na indústria do aço, a geração de coprodutos e resíduos fica em torno de 37% de escória de alto forno, 29% de escória de aciaria, 14% de finos e pós, 5% de lamas, 2% de carboquímicos, dentre outros. Em relação à destinação, 88% foram destinados como coprodutos, 6% destinados ao estoque e 6% movimentados para aterros. Observa-se ainda que para cada tonelada de aço, 594 kg de resíduos sólidos são fomento da utilização de coprodutos como insumo à sinterização.

## **2.4. Destinação dos resíduos siderúrgicos**

Segundo LOPES (2012), muitos dos resíduos podem ser reaproveitados nos alto-fornos desde que sofram um processo de aglomeração, no entanto, existem restrições que devem ser observadas, das quais destacam-se: teor mínimo de ferro ou carbono; umidade; presença de elementos indesejáveis e granulometria.

As escórias de alto-forno quando passam pelo processo de granulação, no qual um jato de água transforma a escória líquida em um sólido amorfo particulado, podem ser destinadas a produção de cimento. Já as escórias de aciaria, após o processamento adequado, podem ser usadas na pavimentação rodoviária ou como lastro ferroviário. (ASSUNÇÃO, 2008)

As escórias de forno panela, com teor de cal superior a 50%, pode ser reaproveitada no próprio processo siderúrgico, inclusive na sinterização como fonte de CaO (OLIVEIRA e MARTINS, 2003). Quando trata-se da destinação do pó de forno elétrico, o mesmo apresenta a desvantagem de conter zinco, oriundo do revestimento de materiais metálicos que viraram sucatas.

O zinco é maléfico ao alto-forno devido ao seu baixo ponto de fusão e ebulição, o que faz com que ele não saia de dentro do alto-forno, pois ao chegar as partes inferiores ele entra em ebulição e sobe arrastado pelos gases e, ao atingir as partes superiores ele condensa e volta a descer junto com a carga. Esta recirculação do zinco causa prejuízos operacionais ao alto-forno, através de incrustações nas paredes e infiltração no refratário. (MANTOVANI, 1998)

Portanto a utilização do pó do forno elétrico na sinterização está condicionada a se obter um sinter com teor de zinco suficientemente baixo que não cause prejuízos operacionais ao alto-forno e a tecnologia aprovada para o processamento do pó de forno elétrico é o forno rotativo Waelz, cujo processo consiste no carregamento de uma mistura de pó de forno elétrico, coque e fundentes no forno, o qual produz escória e óxido de zinco. Este processo é usado em países como; Alemanha, Espanha e Estados Unidos e foi trazido para o Brasil pela Votorantim Metais Juiz de Fora. (ASSUNÇÃO, 2008)

Segundo CUNHA et al. (2006), a carepa que é rica em ferro, deve ser usada com cautela, primeiro em função do teor de FeO que em elevados percentuais atrapalha a propriedade de redutibilidade do sínter. Outra preocupação é o óleo contido na carepa do lingotamento contínuo que pela sobrecarga de voláteis, pode provocar explosões nos precipitadores eletrostáticos (PEREIRA, 2004; YADAV et al., 2002).

De acordo com LOPES (2012), a lama do sistema de lavagem de gases possui o inconveniente da umidade excessiva e para ser usada, precisa passar por um processo adequado, para reduzir o teor de umidade.

O pó do balão, cuja composição química é parecida com o da lama do sistema de lavagem de gases, pode ser usado na sinterização, no entanto, é preciso observar o teor de fenóis, que em alguns casos estão acima do limite admissível de 10 mg/kg. No entanto, para algumas usinas não integradas a pesquisa conduzida por OLIVEIRA e MARTINS (2003) verificou que o pó de balão deveria ser classificado como resíduo Classe I – perigoso.

Entretanto, ALMEIDA e MELO (2001) verificaram que a destinação adequada para este resíduo poderia ser a indústria de cerâmica, uma vez que a concentração de fenol nos tijolos produzidos atingiu de 1,79 mg/kg nos tijolos cru e 0,004 mg/kg nos tijolos queimados, bem abaixo do limite admissível.

Para concluir o tópico em questão JANUZZI (2008), explica que os finos de minério e de carvão vegetal são rotineiramente usados na sinterização, no entanto, a granulometria destes deve ser observada, e se necessário um processo de micropelotização deve ser usado a fim de evitar a perda de permeabilidade no leito de sinterização.

## **2.5. Resíduos siderúrgicos e o meio ambiente**

Segundo ABM (2008), com as exigências do mercado consumidor e a necessidade de cumprir as legislações que regulamentam a questão ambiental, as empresas do setor siderúrgico têm incluído em seu processo produtivo tecnologias limpas. Com este propósito, estão sendo fortalecidas e estimuladas as parcerias

com universidades, instituições de pesquisa e outros segmentos industriais, mediante a promoção de pesquisas e estudos que visam racionalizar o consumo de matérias-primas e insumos, otimizar a eficiência energética e maximizar o aproveitamento dos resíduos siderúrgicos.

Observa-se ainda que as leis brasileiras que tratam do meio ambiente estão entre as mais avançadas e completas do mundo, pois abrangem seis tipos diferentes de crimes ambientais: crime contra a fauna, crimes contra a flora, poluição, crimes contra o ordenamento urbano e o patrimônio cultural, crimes contra a administração ambiental e infrações administrativas. (BRASIL, 2014)

Segundo LOPES (2012), trata-se de uma legislação consolidada, onde as infrações são claramente definidas, havendo uniformidade e gradação adequadas, onde tanto pessoas jurídicas quanto físicas podem ser penalizadas. Empresas podem ser fechadas, caso se comprove que foi criada para facilitar um crime ambiental, mas a punição pode ser extinta quando for comprovada a recuperação ambiental.

O anexo II da Resolução CONAMA nº 420/2009 (BRASIL, 2009) estabelece lista de valores orientadores para solos e para águas subterrâneas. As sanções penais e administrativas para o não cumprimento dos limites estipulados implicam em até quatro anos de reclusão, conforme Art. 54 da Lei nº 9.605/98. (BRASIL, 1998)

De acordo com o Código Penal (BRASIL, 1941), a pena pode chegar a quinze anos caso seja constatado envenenamento de água potável. As multas variam de R\$ 5.000,00 (cinco mil reais) a R\$ 50.000.000,00 (cinquenta milhões de reais), conforme Art. 61 do Decreto 6.514, de 22 de julho de 2008. (BRASIL, 2008)

A Lei 12.305/2010 institui a Política Nacional brasileira de Resíduos Sólidos estabelecendo a logística reversa como instrumento para a destinação final ambientalmente adequada, além da ISO 14001 que reúne a série de normas mensurando as diretrizes relacionadas à gestão ambiental nas organizações e se mantém de acordo com a norma ABNT NBR 10004:2004 além dos selos ecológicos que atestam a participação efetiva e contínua do positivo desempenho ambiental de

produtos pelas certificações do Instituto Falcão Bauer de Qualidade e Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

E para finalizar de acordo com a FIRJAM (2014), as empresas brasileiras segundo a metodologia da ecoeficiência, começam a pensar no ciclo de vida do produto, assim como em suas embalagens. Diante disso tomam medidas para produzir com o menor impacto ambiental, visando a redução de custos nas cadeias produtivas ao mesmo tempo que atendem a todas as exigências legais impostas à performance dos produtos e ao seu destino final.

## **2.6. Gestão de Resíduos Sólidos Siderúrgicos**

A gestão de resíduos sólidos requer integração de quatro fatores: a geração de resíduos sólidos; o sistema de coleta e separação dos recursos naturais presente nos resíduos sólidos descartados; a disposição de forma social e ambientalmente responsável; e a utilização correta em seu destino final. Pois a conscientização sobre as questões do meio ambiente tem aumentado consideravelmente e, em consequência, a importância de novas e inovadoras tecnologias para o tratamento de resíduos.

A Política Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos imputou responsabilidades a todos os envolvidos na gestão, desde a extração de recursos naturais até a disposição final adequada desses rejeitos. Estas obrigações são interligadas por meio de uma complexa teia que enfatiza a colaboração mútua, estimula a contratação de produtos e serviços ambientalmente sustentáveis, mediados por um enfático processo de educação ambiental. (SANTOS, 2015)

Segundo ABM (2008) reciclagem, incineração, tratamentos físico-químicos e disposição final em aterros são alguns dos métodos mais utilizados para o gerenciamento dos resíduos. A seleção do método mais apropriado para a destinação dos resíduos, normalmente, leva em consideração fatores econômicos e tecnológicos, conforme exige a legislação.

As alternativas de tratamento como a reutilização e a reciclagem são apresentadas como uma solução duplamente benéfica, pois contribuem evitando



que este volume de resíduos seja simplesmente disposto em aterros, além de minimizar o uso de recursos naturais não renováveis. (CNI, 2012)

De acordo com SANTOS (2015), a definição de logística reversa se caracteriza como um instrumento de desenvolvimento econômico, social e de proteção ambiental, direcionada por um conjunto de processos destinados à reciclagem do produto pela fonte geradora, seja no ciclo nativo ou em outros processos de produção, focando além da coleta seletiva e da reciclagem, na “pré-ciclagem” pelo consumidor.

Dessa forma o estudo do processo e de suas matérias-primas fornece informações importantes quanto à potencial composição química do resíduo bem como a possíveis fontes de variabilidade.

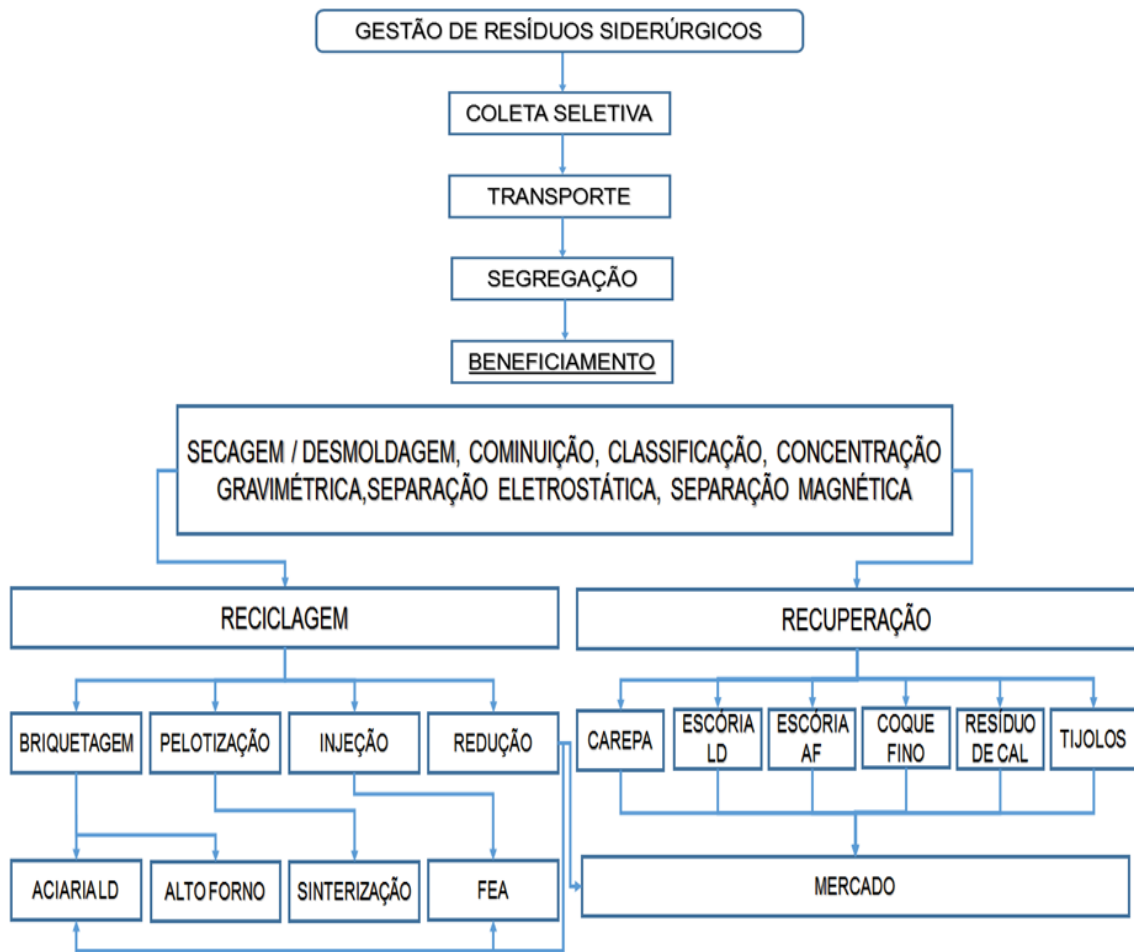
Entende-se também que a estimativa da quantidade de resíduo gerada por determinado tempo e eventuais sazonalidades são importantes para determinar a estrutura necessária para gerir o processo e realizar o tratamento, indicar a escala de produção necessária, o que frequentemente limita as tecnologias e indica tendências futuras da geração de resíduos. (JOHN & ÂNGULO, 2003)

Diante disso LORA (2002), afirma que o entendimento do processo de produção responsável pela geração de um resíduo industrial e a adequada caracterização são pontos fundamentais para o entendimento da sua correta gestão.

Podemos observar na figura 7 os principais processos de reciclagem para a utilização dos coprodutos, assim como as principais etapas para o correto gerenciamento dos resíduos sólidos. A reciclagem dos resíduos sólidos é realizada por meio dos três tipos de processos de aglomeração que se destacam na aglomeração de finos industriais no ramo siderúrgico, tais como; a pelotização, sinterização e a briquetagem.

Nos próximos tópicos explana-se um pouco mais sobre cada um dos tipos de processos de aglomeração e os seus respectivos produtos; a pelota, o sinter e o briquete.

Figura 7: Gestão de resíduos siderúrgicos - Fluxograma



Fonte: SANTOS *et. al.* ABM 2006.

## 2.7. Processos de aglomeração

Segundo PIETSCH (2003), a aglomeração é a união de sólidos particulados devido às forças físicas de curto alcance e forças químicas entre as próprias partículas. Para o processamento dos resíduos é necessário a aglomeração dos mesmos, transformando-os em corpos coesos por meio de mecanismos físico químicos na ligação rígida das partículas entre si, com o objetivo de obtenção de tamanho e forma adequada para o uso na produção de aço.

MOURÃO, (2008) explica que durante as primeiras décadas do século XX, o desenvolvimento dos altos-fornos eram basicamente melhorias no que já estava

bem estabelecido. Embora muitas tentativas e investimentos tivessem sido realizados com pesquisas e rotas inovadoras, por vezes radicais para o processamento de finos de minério, nenhuma delas foi aprovada e consagrada em caráter industrial.

Pois os finos de minério de ferro não podem ser utilizados diretamente no alto-forno, devido ao processo de contracorrente no qual os sólidos descem contra o fluxo gasoso ascendente. Porém, grandes avanços foram feitos na preparação do minério de ferro, através da aglomeração destes. A seguir explana-se um pouco sobre os três principais tipos de aglomeração.

### **2.7.1. Processo de Briquetagem**

Segundo LEMOS (2015), Briquetagem é a forma de aglomeração das partículas em que através da pressão imposta sobre a matéria-prima, é obtido um produto compacto, chamado de briquete. A briquetagem possibilita a reciclagem de materiais, em específico, resíduos siderúrgicos, os quais podem ser reutilizados dentro da própria usina de produção de aço.

LUCENA (2008) descreve a briquetagem como um processo em que consiste na aplicação de pressão a uma massa de partículas, com ou sem adição de ligante, e com ou sem tratamento térmico posterior. Esse processo envolve força coesiva entre os sólidos, adesividade do ligante, comportamento reológico do conjunto partícula-ligante e, fundamentalmente, propriedades físicas das partículas e química de superfície.

Dessa forma entende-se que Briquetagem é o processo de aglomeração de pequenas partículas de material sólido através de pressão adequando a moldagem do coproduto em maiores dimensões e de forma compacta com parâmetros mecânicos definidos. Assim estes materiais podem ser empilhados facilitando o transporte e armazenamento.

De acordo com ROCHA (2007), os aglomerados devem ter resistência ao manuseio, estocagem e para utilização no processo de alimentação dos altos-

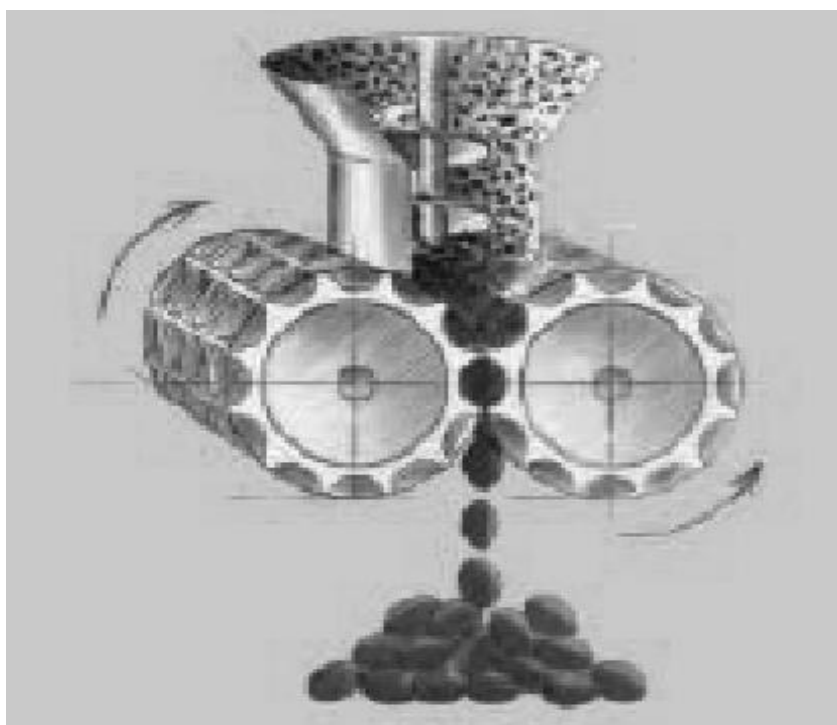
fornos. Muitos fatores influenciam nessa resistência, como: pressão de briquetagem, teor de ligantes, umidade, temperatura e o tempo de cura. Este pode ser importante para o processo, a depender do tipo de ligante e resíduo utilizado.

O estabelecimento de critérios pela escolha do melhor método de briquetagem é em função da produtividade, consumo de energia e custos de investimento.

Na figura 8 podemos observar um exemplo de briquetagem utilizando a compressão em prensa de rolos, um dos métodos mais utilizados e eficazes existentes quando se trata de briquetagem.

O tempo de atuação da força sobre o material é dependente da granulometria, haja visto que quanto mais fino o material, maior será a quantidade de vazios a serem eliminados durante o processo de briquetagem. Este fenômeno também influencia diretamente a redução de volume do material durante a sua compactação, e assim a densidade do mesmo.

Figura 8: Briquetagem por compressão em prensa de rolos



Fonte: KÖPERN (et. al.).

Na briquetagem podemos aplicar aglomerante para manter a coerência do produto após retirada a pressão. Os aglomerantes podem ser classificados de acordo com a função no briquete tais como; matriz, película e químicos.

Aglomerantes do tipo matriz engastam as partículas em uma fase aglomerante substancialmente contínua. Aglomerantes do tipo película, como colas, geralmente, dependem da evaporação da água ou de algum solvente para desenvolver sua resistência. Aglomerantes químicos podem ser tipo película ou matriz. (GRANDIN, et. al., 1994; KOMAREK, et. al, 1967; e ROMAN, et. al, 1989)

Como exemplo de aglomerante em processos siderúrgicos, temos o cimento Portland para briquetes com carepa ou cal e melaço na aplicação do minério de ferro, outra aplicação clássica deste processo é a briquetagem de finos de carvão.

De acordo com SAMPAIO, COSTA & ANDRADE (2007), o tipo de aglomerante tem impacto direto nas propriedades dos briquetes. Outro ponto importante quando trata-se de briquetagem é o sistema de endurecimento que ocorre a temperatura ambiente, em estufas ou fornos. Quando o mesmo é submetido a temperatura elevada sendo aplicados a baixa pressão, o resultado são briquetes com baixa resistência mecânica. (CARVALHO & BRINCK, 2010)

### **2.7.2. Processo de Pelotização**

De acordo com SILVA (2010), as pelotas são aglomerados de finos de minério de ferro conhecidos como pellet feed e são gerados na lavra. Junto com o sinter e o minério granulado, as pelotas são as principais cargas de alimentação dos fornos de redução para a obtenção do ferro primário.

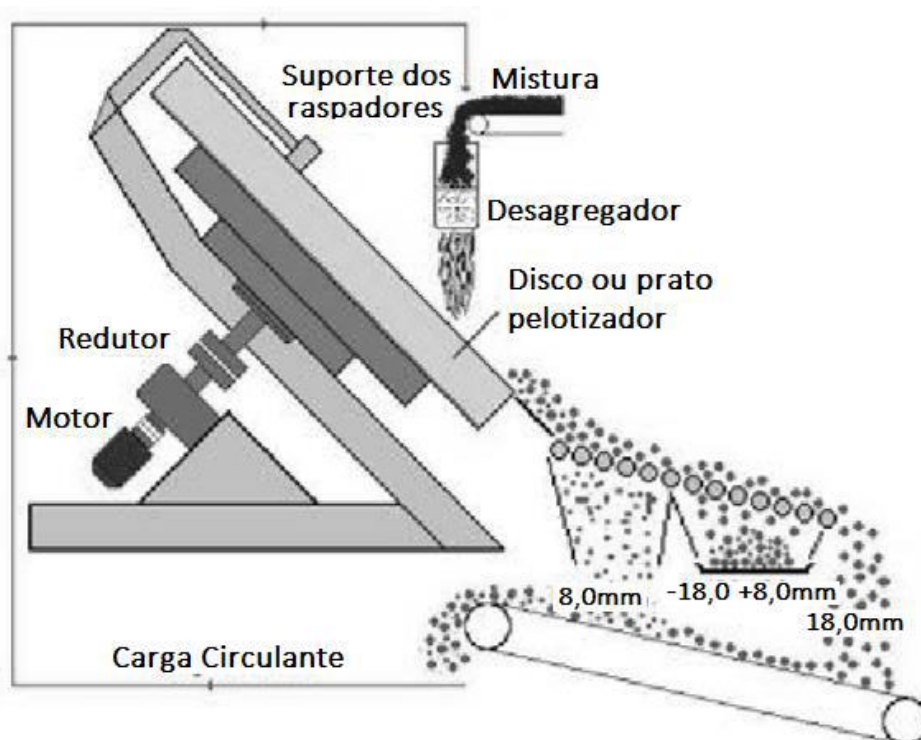
Segundo a CNI (2012) a pelotização é o processo de compressão ou moldagem de um dado material na forma de “pellet” (pelota) apresentando-se em forma de esfera e compreendido dentre três estágios: preparação das matérias-primas, formação das pelotas cruas e processamento térmico.

CAMPOS & FONSECA (2010), afirmam que o processo de pelotização consiste na mistura úmida de finos de minério de ferro concentrados na fração

menor que 0,149 mm com quantidades pré-definidas de aglomerante, óxidos básicos, e energéticos, seguida de rolamento em disco ou tambor, que pela ação da tensão superficial de capilaridade, promove a formação de um aglomerado esférico de tamanho entre 8 e 18mm, as pelotas.

Depois de submetidas a um tratamento térmico específico, apresentam elevada resistência mecânica ao manuseio e propriedades metalúrgicas superiores quando submetidas ao processo de redução. O processo de Pelotização é demonstrado na figura 9 por meio do disco de pelotamento.

Figura 9: Disco de Pelotamento



Fonte: FONSECA, et. al., 2003.

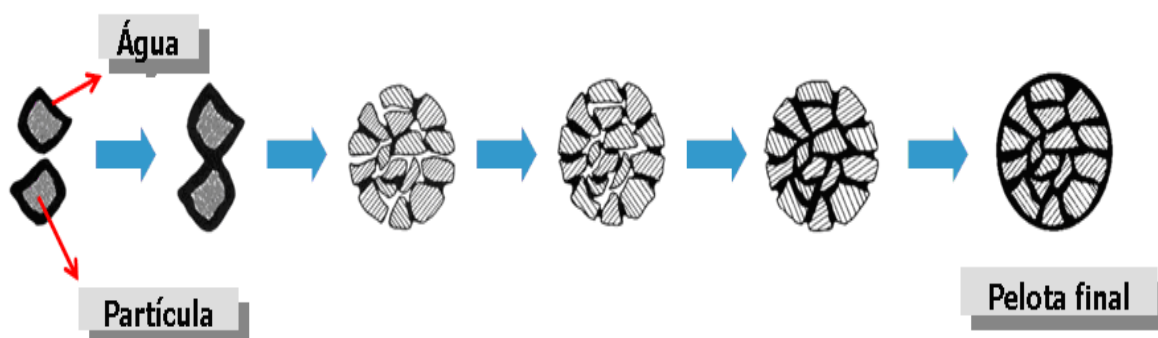
A pelotização pode ser fornecedora da sinterização quando esta produz micropelotas crua como matéria prima no lugar do “sinter feed” para nucleação a fim de tornar a mistura permeável permitindo a homogeneidade no leito. Um dos principais parâmetros que garante esta homogeneização é o grau de umidade. (TAKEHARA, 2004)

As plantas de pelotização podem se apresentar junto as minas, como na Vale em Congonhas do Campo e Nova Lima situadas em Minas Gerais; ou junto aos

portos de embarque, neste caso voltadas para o mercado externo, como na Samarco Mineração S/A. em Ubú Vale no Espírito Santo e São Luiz do Maranhão. A relação de rendimento deste processo é dada pela relação de 1,08 toneladas de minério de ferro para cada tonelada de pelota tendo 12% de participação na produção mundial. (MOSZKOWICZ, 2004)

Como em qualquer processo de produção, a qualidade do produto final depende do sucesso em cada uma das etapas. Por exemplo, não é possível obter pelotas com boa resistência na etapa de endurecimento se elas tiverem sido mal formadas nas etapas anteriores. Diante desse pressuposto procura-se entender um pouco mais sobre o mecanismo de formação da pelota demonstrado na figura 10 abaixo:

Figura 10: Mecanismo de formação da pelota.



Fonte: Adaptado de (Srb & Ruzicková, 1988)

Quando uma partícula é umedecida, um filme fino de água é formado na sua superfície e ao entrar em contato com outra partícula úmida, ocorre uma ligação. Onde se observa que as partículas inicialmente unidas por esta ligação são o núcleo, no qual ocorrerá todo o crescimento da pelota.

Os núcleos formados vão sendo rotacionados e mais partículas vão sendo aderidas a eles, gerando bolas. Onde o processo realizado é similar ao de uma bola de neve rolando numa ladeira íngreme, o que resulta num corpo redondo.

No entanto, uma grande quantidade de ar ainda fica presente no interior da pelota, o que prejudicaria sua resistência mecânica. Todavia, à medida que as

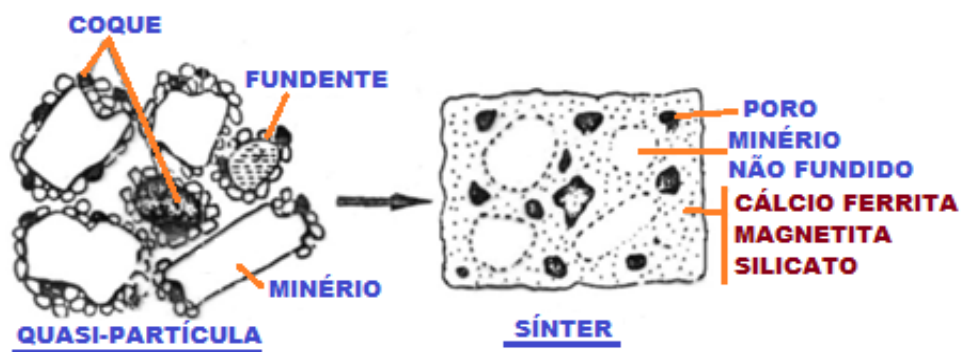
partículas vão se chocando entre si e com as paredes do equipamento, o ar recluso vai sendo expelido e as forças de ligação vão sendo intensificadas.

Esse processo ocorre até as forças de ligação estarem desenvolvidas e as pelotas prontas para seguir nas etapas posteriores. As partículas se mantêm aglomeradas através da força de capilaridade causada pela tensão superficial. A tensão superficial é gerada pela coesão entre as moléculas do líquido e pela adesão entre o líquido e a superfície do material. (SRB & RUZICKOVÁ, 1988)

### 2.7.3. Processo de Sinterização

Segundo NAJAR (1981), 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 sínter, apresenta características químicas, físicas e metalúrgicas compatíveis com as solicitações do alto-forno. O processo de sinterização pode ser definido de acordo com o esquema de representação observado nas figuras 11 e 12:

Figura 11: Esquema simplificado do processo de sinterização.



Fonte: USP, 2001

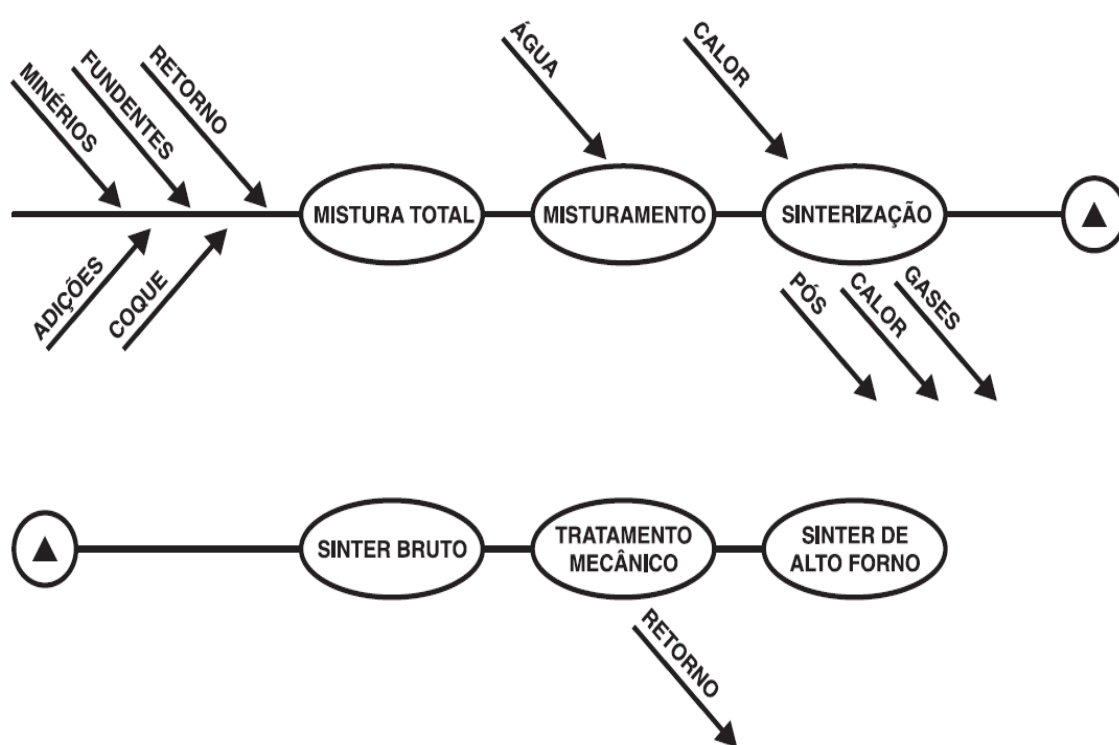
Observa-se que no processo de sinterização dos coprodutos com granulação fina são compactados, transformando-se em corpos coesos por meio de mecanismos físico-químicos quando submetidos a elevadas temperaturas, ligeiramente menores que a temperatura de fusão, pois o objetivo é a criação de



uma matéria prima aglomerada, denominada sínter, com dimensões e formas adequadas ao processo.

De acordo com Honorato (2005), as principais características exigidas para um sínter de qualidade são: não conter elementos químicos indesejáveis para o alto-forno; composição química estável; elevado teor de ferro; baixo volume de escória; elevada resistência mecânica; granulometria estável e baixa porcentagem de finos.

Figura 12: Processo de Sinterização



Fonte: Honorato, 2005.

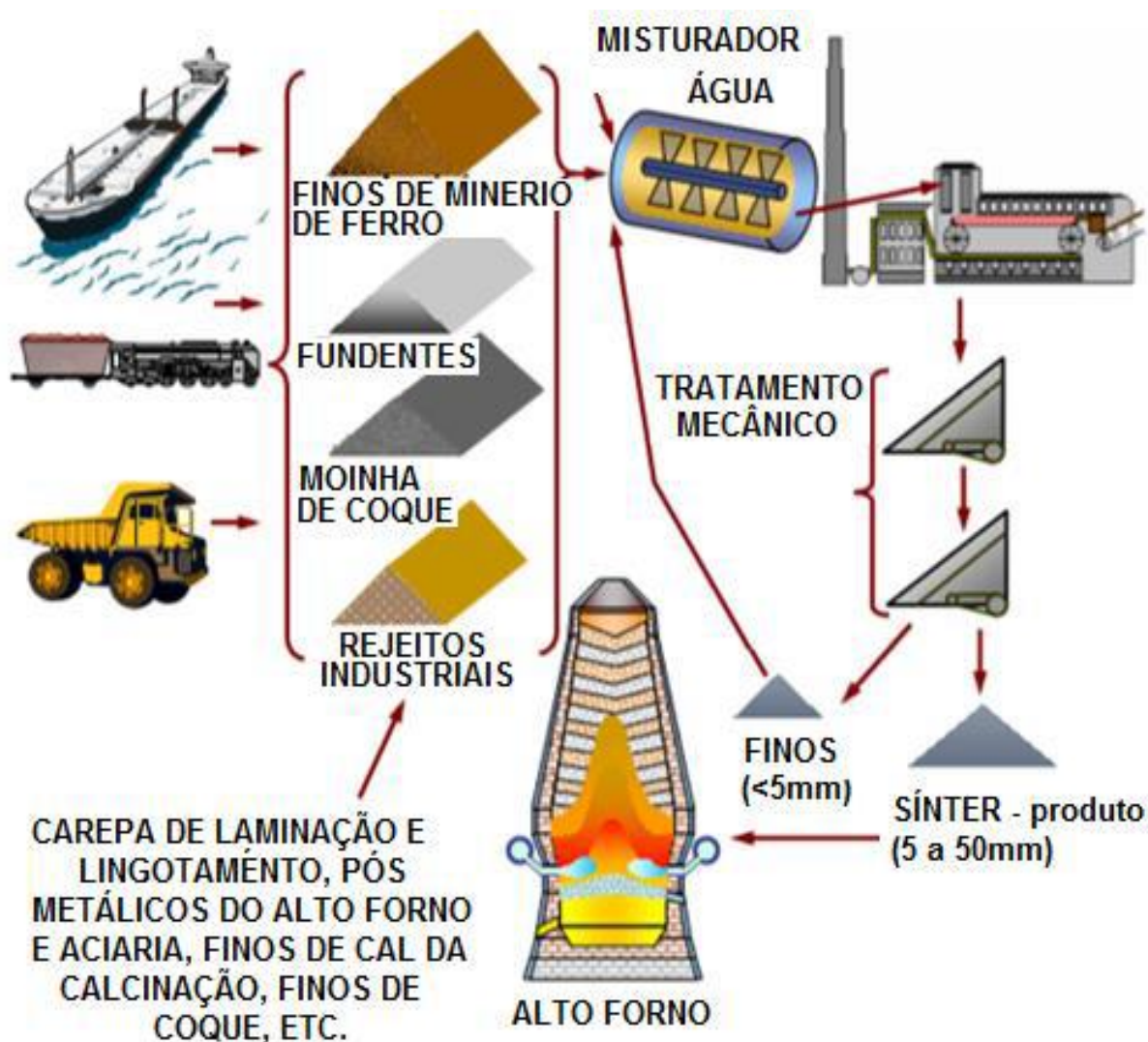
Devem ser observadas também as características do tipo: poder de aglomeração a frio, porosidade, forma de grão, crepitação, densidade, e a granulometria deve variar entre 0% de fração > 10,0 mm, 45% a 60% da fração de 1 a 10,0 mm, e menor de 15% da fração < 200 mesh. (MACHADO, 2006)

Existem dois tipos de sínter; o primeiro tipo denomina-se os não auto fundentes que são aqueles originários de minério de ferro hematítico ou magnético, e sem nenhuma base de CaO.MgO. E o segundo tipo são os denominados auto

fundentes onde há o acréscimo de fundentes sendo ainda caracterizados pela relação  $\text{CaO/SiO}_2$  denominada basicidade.

LOPES (2012) descreve os tipos de estrutura através do mecanismo de sinterização a diferentes temperaturas aplicadas na obtenção de sínter. Dessa maneira é possível a produção de dois tipos de sínteres; os homogêneos que são obtidos com altas temperaturas de sinterização ( $>1300^\circ\text{C}$ ) e os heterogêneos que são produzidos a temperaturas menores.

Figura 13: Fluxograma do processo de sinterização.



Fonte: CHAVES 2009.

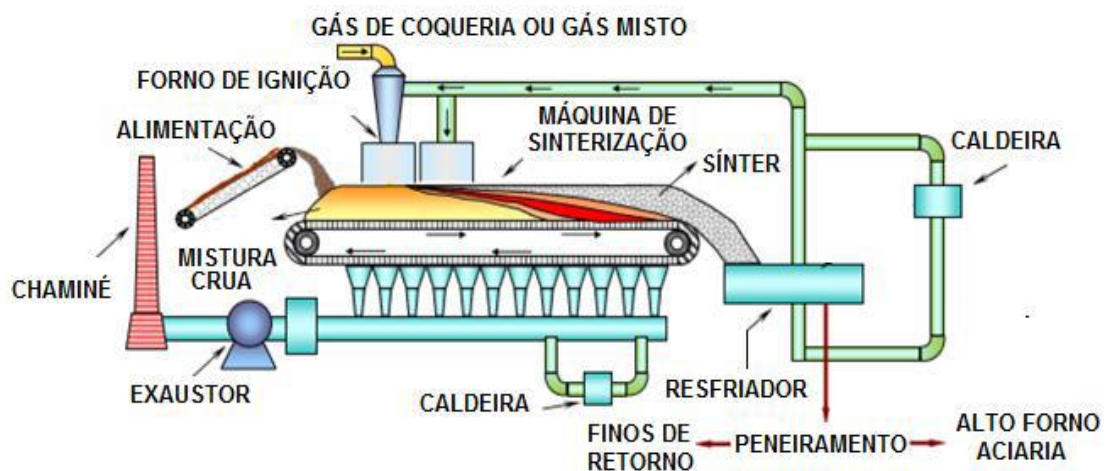
Podemos observar na figura 13 o fluxograma do processo de sinterização demonstrando as entradas e saídas do processamento do sínter. Onde temos a

mistura de finos de minérios, coque, fundentes e rejeitos entre outros dentro do Misturador, que são esses rejeitos que antes eram descartados que devemos reaproveitar.

Quando adicionado água e o calor submetendo a tratamento térmico temos a produção do “sinter bruto”. Após ser realizado o “tratamento mecânico”, temos a geração de finos e “sinter de retorno” < 5mm que podem ser reutilizados novamente no início do processo, e por fim temos o “sinter para aplicação no Alto forno” com granulometria 5 a 50mm.

Segundo CHAVES (2009), são dois os processos industriais utilizados: o primeiro é o processo intermitente Green Walt em usinas de pequeno e médio porte podendo atingir a capacidade de 1500t/dia, e o segundo é o processo contínuo Dwight-Lloyd em grandes usinas e um dos exemplos podemos observar na Figura 14.

Figura 14: Sistema de sinterização contínua tipo Dwight–Lloyd.



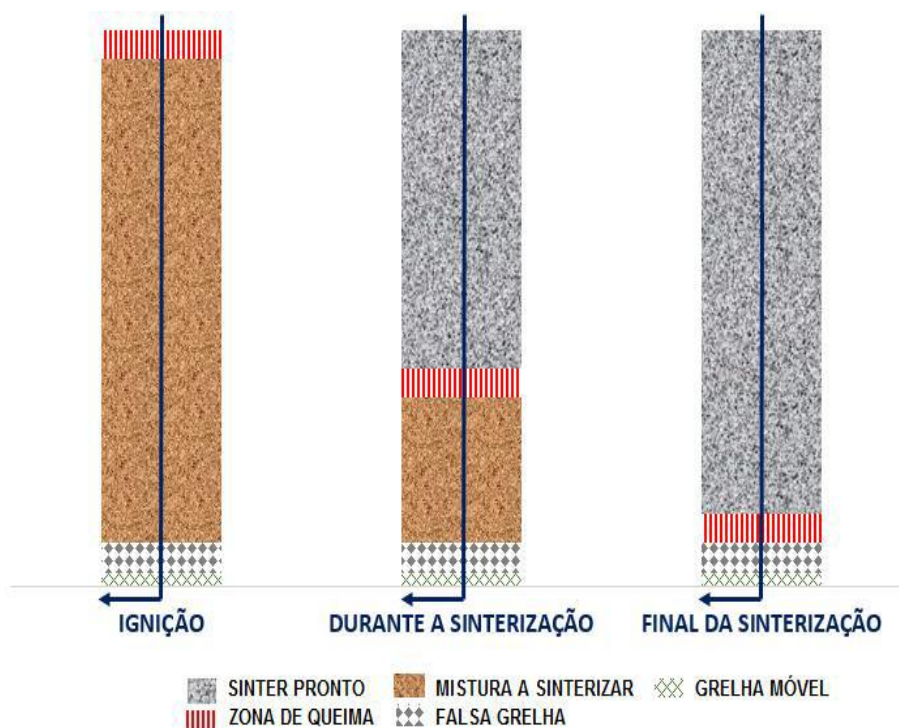
Fonte: CHAVES 2009.

As etapas para a formação do sinter são:

- Dosagem de finos de minério de ferro, fundentes, adições, resíduos sólidos, sinter de retorno e combustível sólido;
- Umidificação da mistura para controlar a permeabilidade da camada com a finalidade da obtenção da resistência mecânica;

- Carregamento da mistura em painelas / leito utilizando de esteiras contínuas para o abastecimento do forno;
- Adição de carvão sobre a superfície da mistura a fim de promover a ignição e assim a combustão da superfície da mistura pelo calor gerado do forno sobre o leito pela ação de maçaricos;
- Progressão da frente de combustão com a queima do combustível disseminado na mistura através da passagem do ar da sucção do sistema de exaustão, que entra em contato com as partículas combustíveis na mistura;
- Vaporização da água da mistura pelo avanço da frente de combustão atingindo o fundo do leito. Ocorre a decomposição dos carbonos hidratados (calcário, dolomita,  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NH}_2\text{O}$ , etc);
- Adesão de partículas metálicas pela fusão parcial, caldeamento, das mesmas permanecendo ligadas por uma matriz de escória.

Figura 15: Movimento da frente de combustão



Fonte: MACHADO 2006.

Na figura 15 é demonstrada a sucção de ar, de cima para baixo, e o avanço da frente de combustão até que esta atinja a base do leito completando o processo para a saída do bolo de sínter do leito. A frente de combustão percorre toda a carga a ser sinterizada no forno e devido a contínua passagem do ar de sucção inicia-se o resfriamento do bolo até a falsa grelha.

Observa-se que o ar é succionado de cima para baixo através da ação dos exaustores passando através de toda a mistura onde ocorrem os fenômenos de transferência de calor e ativação de reações químicas. A continuidade da combustão é dada através das reações junto à frente de combustão até atingir o fundo do leito nas grelhas.

TAKEHARA (2004) descreve o desenvolvimento destes fenômenos identificando como parâmetros críticos a vazão de ar além da reatividade e quantidade de combustível.

Onde os desenvolvimentos desses dois fenômenos principais ocorrem das seguintes formas:

- Transferência de calor (físico) - é proporcionada pela sucção forçada de ar da camada superior para a inferior do leito de sinteração, criando uma frente térmica, cuja velocidade de propagação é proporcional à vazão de ar;
- E a combustão do coque (químico) - produz calor, gerando uma frente de reação química, cuja evolução é função da reatividade e da quantidade de combustível e da umidade e composição química da mistura.

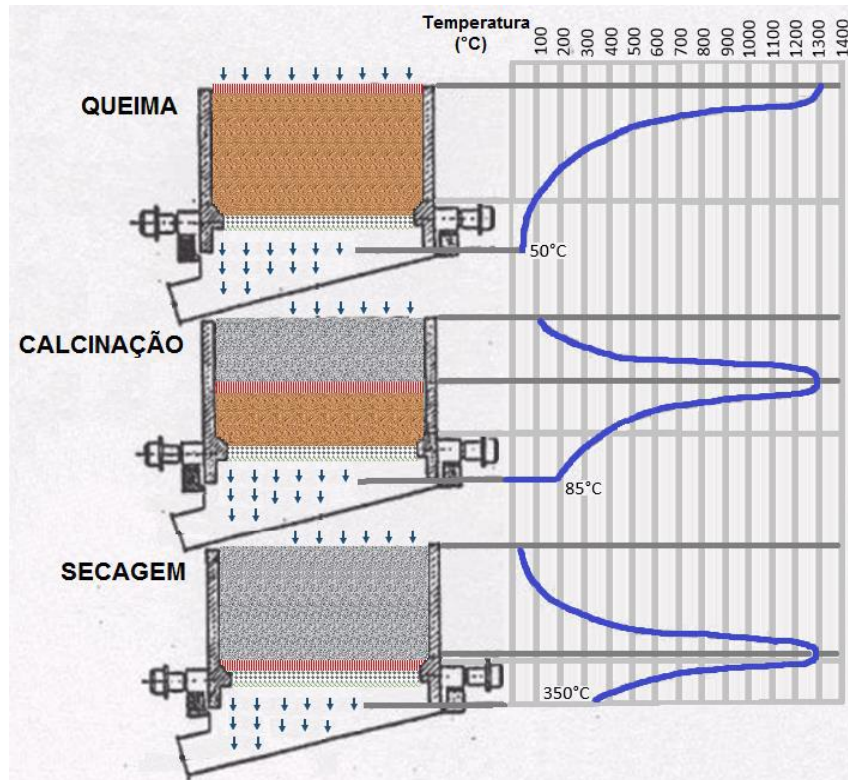
As temperaturas no sistema de sinterização a cada etapa são demonstradas sequencialmente na Figura 16, em que a zona de queima atinge 1300°C e o ar após a grelha móvel varia de 50°C no início do processo, durante a queima e até 350°C na secagem.

Pode-se notar que a temperatura mais alta é verificada no momento da ignição acompanhando a frente de queima por toda a mistura. Há a troca térmica do ar de sucção e a carga até a combustão atingir o final da esteira. O indicador térmico



do processo é a medição de temperatura abaixo da saída do ar de sucção sendo considerada como uma medição indireta da qualidade do sinter.

Figura 16: Esquema da máquina de sinterização intermitente demonstrando avanço e temperatura da frente de combustão.



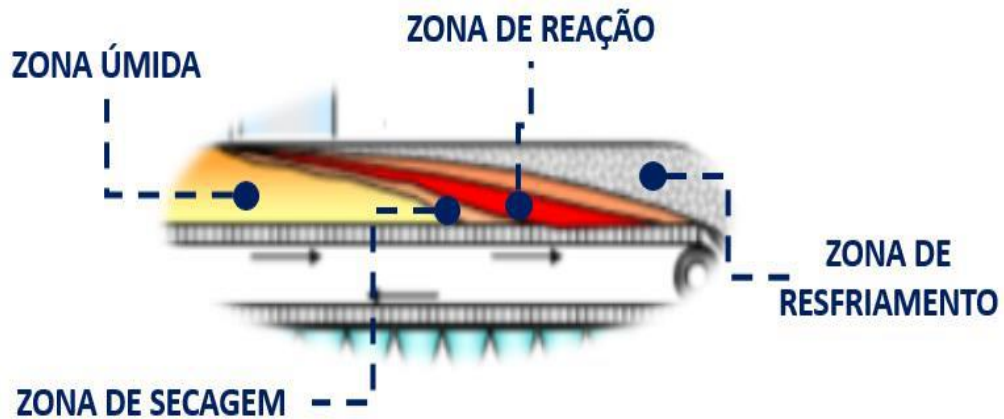
Fonte: MACHADO 2006,

As etapas de sinterização são descritas pelas zonas: zona úmida, zona de secagem, zona de reação e zona de resfriamento que são representadas no esquema a seguir da figura 17, onde temos o corte longitudinal do leito da máquina de sinterização contínua.

As zonas de sinterização descrevendo o ocorrido simultaneamente durante cada etapa do processo em que a zona úmida é iniciada com a vaporização da umidade ocorrendo a hidratação da cal ao atingir 100°C.

Através da sucção do ar, o vapor atinge as camadas inferiores mais frias condensando novamente desenvolvendo nesta região uma umidade superior à média. Logo acima, na zona de secagem ocorre a desidratação de hidróxidos atingindo temperatura de 500°C.

Figura 17: Corte longitudinal do leito da máquina de sinterização contínua.

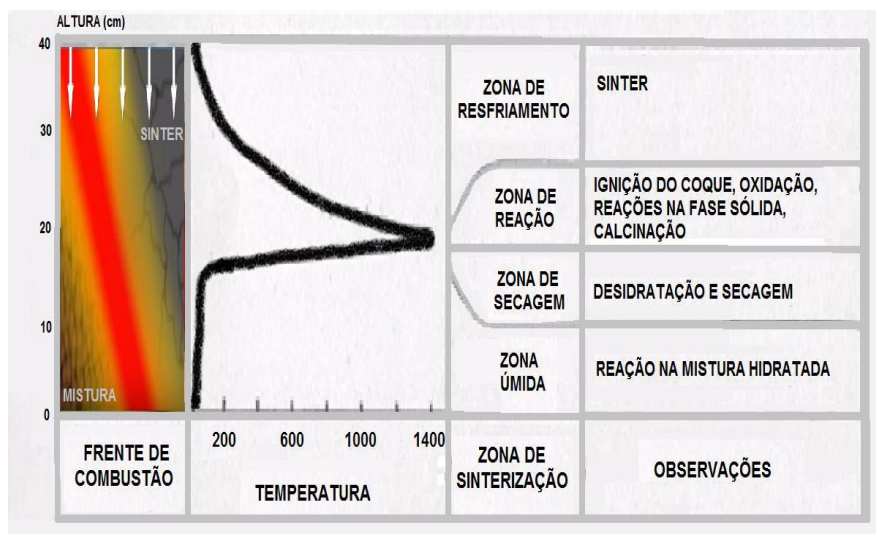


Fonte: CHAVES 2009.

Com a combustão do coque e início da reação exotérmica, caracteriza-se a zona de reação com intenso desprendimento de calor até 1300°C ocorrendo a decomposição de carbonatos, reações na fase sólida; calcinação, redução e reoxidação.

Atingindo a temperatura de 900°C inicia a zona de resfriamento completando o ciclo de reações químicas e indicando o final da produção do bolo de sinter para a máxima permeabilidade do leito, e assim a maior vazão de ar, devido ao aumento da porosidade. A temperatura em cada uma das zonas é característica das reações de transformação que são representadas através da Figura 18.

Figura 18: Corte transversal do leito de uma máquina de sinterização contínua.



Fonte: MACHADO 2006.

### 2.7.3.1. A importância dos Fundentes na Sinterização

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 sínter uma resistência adequada à sua utilização no alto-forno.

Os fundentes são classificados em duas categorias: básicos que são aqueles portadores de CaO e/ou MgO e os ácidos que são aqueles portadores de SiO<sub>2</sub> e/ou Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

De acordo com MACHADO (2006), os principais fundentes aplicados aos processos com granulometria para sinterização encontrada em torno de 0 a 3mm e de 10 a 30mm são: Calcário (portador de CaO); Cal (portador de CaO); Dunito (portador de MgO e SiO<sub>2</sub>); Serpentinó (portador de MgO e SiO<sub>2</sub>); Dolomita (portador de MgO e SiO<sub>2</sub>) e Quartzo (portador de SiO<sub>2</sub>).

Quando produzidos apenas com minério de ferro, o sínter apresenta-se com baixa redutibilidade devido à alta quantidade de fayalita, oriunda da sílica da ganga de minério, sendo necessário o abastecimento de cal e quartzo direto no forno com o inconveniente do aumento do consumo de coque. Assim, a aplicação de fundentes na mistura do sínter pode ser considerada uma melhoria na redução do consumo de coque do alto forno.

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.

Segundo HONORATO (2005), 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, lixo industrial, 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.

De acordo com PIMENTA et al (2002), as propriedades a altas temperaturas dos sinteres são geralmente melhoradas pela elevação de seu teor de MgO. Ele mostrou que o MgO eleva a temperatura de fusão de escórias com elevados teores de FeO. Segundo estes autores, a adição de MgO é menos efetiva para sinteres do que para pelotas, devido as baixas reatividades, dos materiais fonte de MgO.

Segundo MUKHERJEE. et al, (1995), como fonte de MgO, as sinterizações normalmente utilizam silicatos de magnésio: olivina (dunito) ou serpentinito, a diferença de um para o outro está na forma hidratada que este último silicato apresenta:  $Mg_6Si_4(OH)_8$ . Outra fonte de MgO bastante utilizada é a dolomita, que é um carbonato de magnésio, pouco reativo e que demanda altas taxas de energia para a decomposição destes compostos. (NATAL et al, 1995)

### **2.7.3.2. Combustíveis para Sinterização**

Segundo HONORATO (2005), combustível é um material que se queima sob condições próprias, em contato com o ar, gerando calor. Conforme TAKEHARA (2004), o combustível para a sinterização deve possuir alto poder calorífico, sendo aplicado normalmente a moinha de coque. Na sinterização dois combustíveis são usados com finalidades distintas:

- Combustível gasoso (Gás de Coqueria, Alto-forno ou Natural) ou líquido (Óleo): esse tipo de combustível é queimado no forno de ignição, com excesso de ar, para acender o combustível sólido contido na mistura, desencadeando o processo de sinterização.
- Combustível sólido (Coque Metalúrgico, Coque de Petróleo, Antracito e Carvão Vegetal): esse combustível é parte integrante do leito de sinterização, tem por finalidade queimar-se em presença de ar. Além de fornecer o calor necessário ao processo tem por finalidade promover uma permeabilidade

controlada no seio da mistura em estado de semi-fusão, deixando vários (poros) à medida que se queima. (SUGAWARA, 1981)

O coque é o combustível mais usado em sinterização. Primeiramente porque possui todas as características físicas e químicas desejadas; em segundo lugar, porque, com seu uso, são aproveitados os finos de coque fora da especificação granulométrica para os altos-fornos.

Nas usinas que operam com alto-fornos a carvão vegetal, os finos desse combustível são usados nas sinterizações. O antracito, pode ser usado na sinterização com resultados bastantes aceitáveis. Nas usinas brasileiras o uso do antracito também já está consagrado. Tal fato se deve à sua boa performance quando usado nas proporções de até 50% e a busca constante das siderúrgicas em elevar o rendimento coque enornado / carvão, gerando déficits de coque fino, cada vez maiores, nas sinterizações.

O coque de petróleo pode e é usado com bons resultados em substituição parcial ao coque ou carvão vegetal, desde que se controle a emissão de SOx quando da utilização deste combustível sólido. Quanto à sua composição química, o principal fator de controle é o teor de carbono que deve ser máximo. No caso específico do coque fino, antracito e coque de petróleo, o enxofre, deve ser controlado, uma vez que os gases gerados são altamente prejudiciais para os equipamentos de exaustão e para o homem por serem corrosivos e tóxicos.

Segundo (LOVEL et al., 2009), nas plantas de sinterização tradicionais, o coque breeze (finos de coque), é normalmente usado como combustível. Entretanto em altos fornos a carvão vegetal, normalmente há sobra da moinha de carvão, ou seja, finos de carvão com tamanho de partículas inferior a 9 mm, que pode substituir o coque breeze na função de combustível. No entanto, há diferença entre a reatividade do carvão vegetal e a do coque, o que pode levar a diferença na qualidade e na produtividade do sinter. Pois combustíveis com maior reatividade geram velocidades de frente de chama maiores, o que acarreta em maior produtividade na sinterização.

Em linhas gerais, independentemente do tipo de combustível ele deve possuir elevado poder calorífico, reatividade média, granulometria e composição química

adequadas. No que tange a qualidade do sinter, a resistência a frio do sinter também é afetada pela reatividade do combustível, ou seja, a resistência do sinter cai a medida que a reatividade do combustível aumenta.

### 2.7.3.3. Qualidade do Sinter

Um bom sinter deve ter mais de 60% de ferro, o mínimo de enxofre e fósforo, adequada resistência mecânica de acordo com as norma vigente e resistir a temperaturas elevadas e aos esforços no interior do forno sem amolecer. A qualidade do sinter é usualmente definida pelas propriedades físicas e químicas obtidas, nas quais essas podem ser verificadas na tabela 1.

Quando trata-se da obtenção de um sinter com adequada qualidade, podemos ressaltar como as principais características: **Adequada resistência mecânica a abrasão e a queda**; Porosidade; Redutibilidade e granulometria controlada; Composição química constante e controlada; e por último o baixo custo de produção com alto rendimento.

Tabela 1: Propriedades físicas e químicas do sinter.

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

Fonte: Adaptado de CETEM 2004.

Segundo Honorato (2005), para que o tratamento mecânico do sinter seja realizado, o produto passa por um processo de adequação granulométrica que consiste na britagem e peneiramento ajustando sua distribuição granulométrica às exigências dos altos-fornos. Normalmente esta distribuição granulométrica situa-se na faixa de 5,0mm a 40,0mm de diâmetro de partículas para o sinter, com um tamanho médio aproximado de 20mm. O fluxo operacional para isto e os equipamentos variam conforme as características e disponibilidade de layout das empresas.

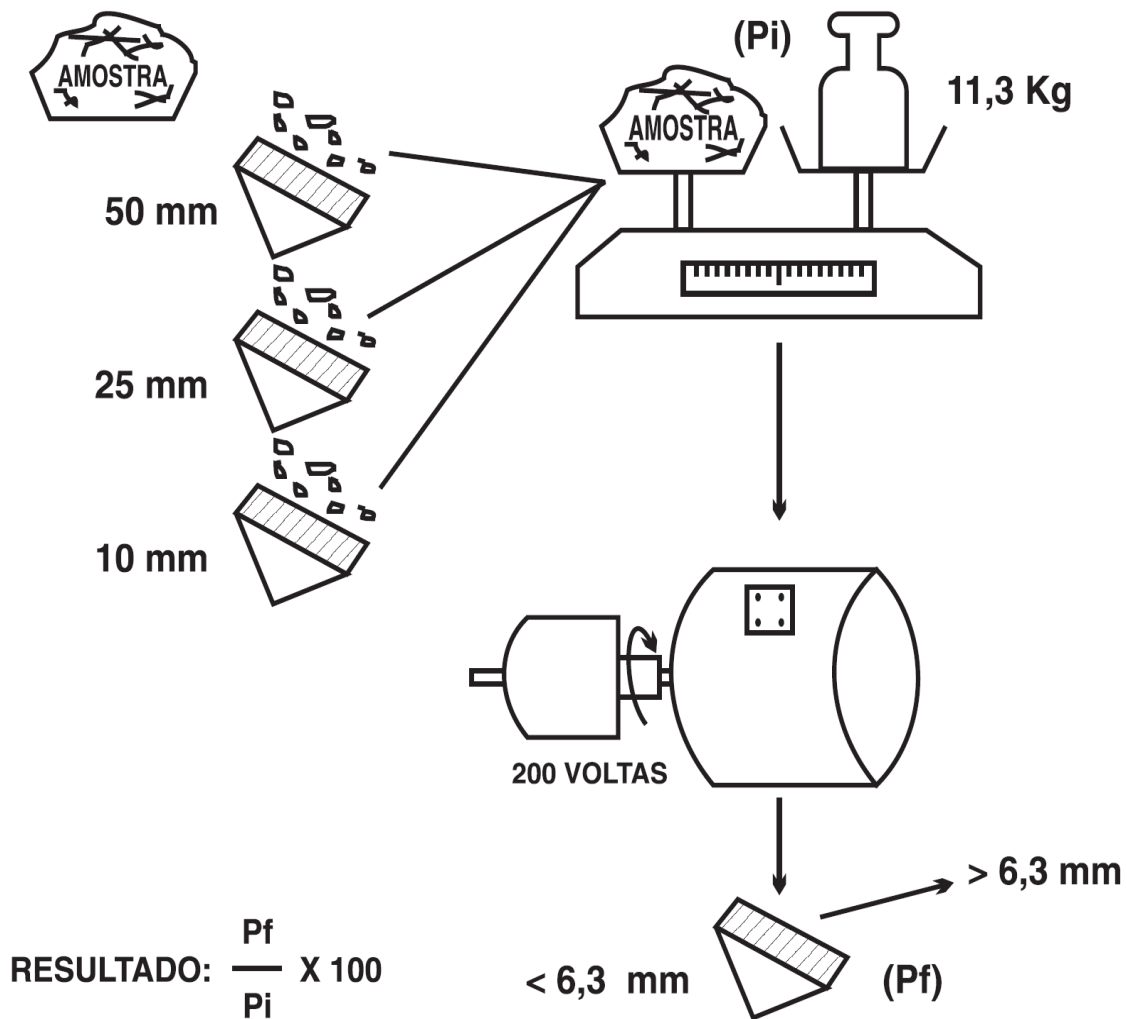
Para determinar a degradação física sofrida pelo transporte do produto são caracterizadas a perda de peso do produto pela resistência a queda, quantificando as partículas de tamanho inferior de 3,3 a 4,7mm após 10 a 15 min de peneiramento em peneirador vibratório atingindo a perda de 5 a 15% do peso inicial. Este tipo de ensaio permite demonstrar a geração de finos e possível redução do rendimento do processo e o outro ensaio utilizado avalia a resistência ao tamboramento podendo variar entre 68% a 72%. (CETEM 2004 *apud* DIAS 2011)

O presente trabalho possui como foco a caracterização da resistência mecânica do coproduto, oriundo de resíduos sólidos siderúrgicos originados no processo siderúrgico primário. E dentro das características necessárias para a definição de um sinter de qualidade adequada para utilização no alto-forno na produção do aço, podemos ressaltar a "Alta resistência mecânica a abrasão e a queda" que são avaliados por meio dos testes de Shatter e Tumbler. Os quais podemos ressaltar algumas características e informações importantes abaixo:

O Tumbler Test tem por finalidade medir a resistência do material à abrasão, quando submetido ao atrito com as paredes do forno e à própria carga. Onde o objetivo do teste é avaliar a degradação do material ao longo do processo, ou seja, quanto o sinter ficou quebradiço e perdeu na forma de fino. Esta degradação prejudica a permeabilidade da carga no alto-forno, diminuindo assim a produção.

Na figura 19 podemos observar um esquema de representação do teste e suas principais etapas:

Figura 19: Esquema do Tumbler Test.



Fonte: HONORATO, 2005.

Com base na norma JIS M 8712 os principais procedimentos operacionais deste método são:

- Determinação da distribuição granulométrica do material por meio do peneiramento nas peneiras de malhas de (6,3; 10; 25 e 50mm) para minérios e (10; 25 e 50mm) para sinter;
- Após pesagem de cada fração, compor uma amostra de 11,3kg que será chamado de peso inicial na realização do teste (Pi) para minério e 23kg para sinter;

- Introdução da amostra em um tambor rotativo e a submeter a 200 voltas consecutivas;
- Peneiramento do material após as 200 voltas em uma peneira de malha de 6,3mm para minério de ferro e sinter, tomando-se o peso do retido (Pf).

Após a realização dos procedimentos operacionais, aplica-se a fórmula do resultado descrita na figura 19 e a aprovação se dá de acordo com os seguintes parâmetros: + 6,3 mm  $\geq$  75% para o minério, e + 6,3 mm  $\geq$  60% para sinter.

O Shatter test por sua vez tem como finalidade medir a maior ou menor susceptibilidade do material em produzir finos, quando submetido a quedas durante o seu transporte e abastecimento no alto-forno.

De acordo com LOPES (2012), o teste é realizado para determinar a resistência mecânica do sinter produzido. Esta é uma característica muito importante uma vez que o sinter se degrada durante a sua movimentação até ser definitivamente carregado no topo do alto-forno.

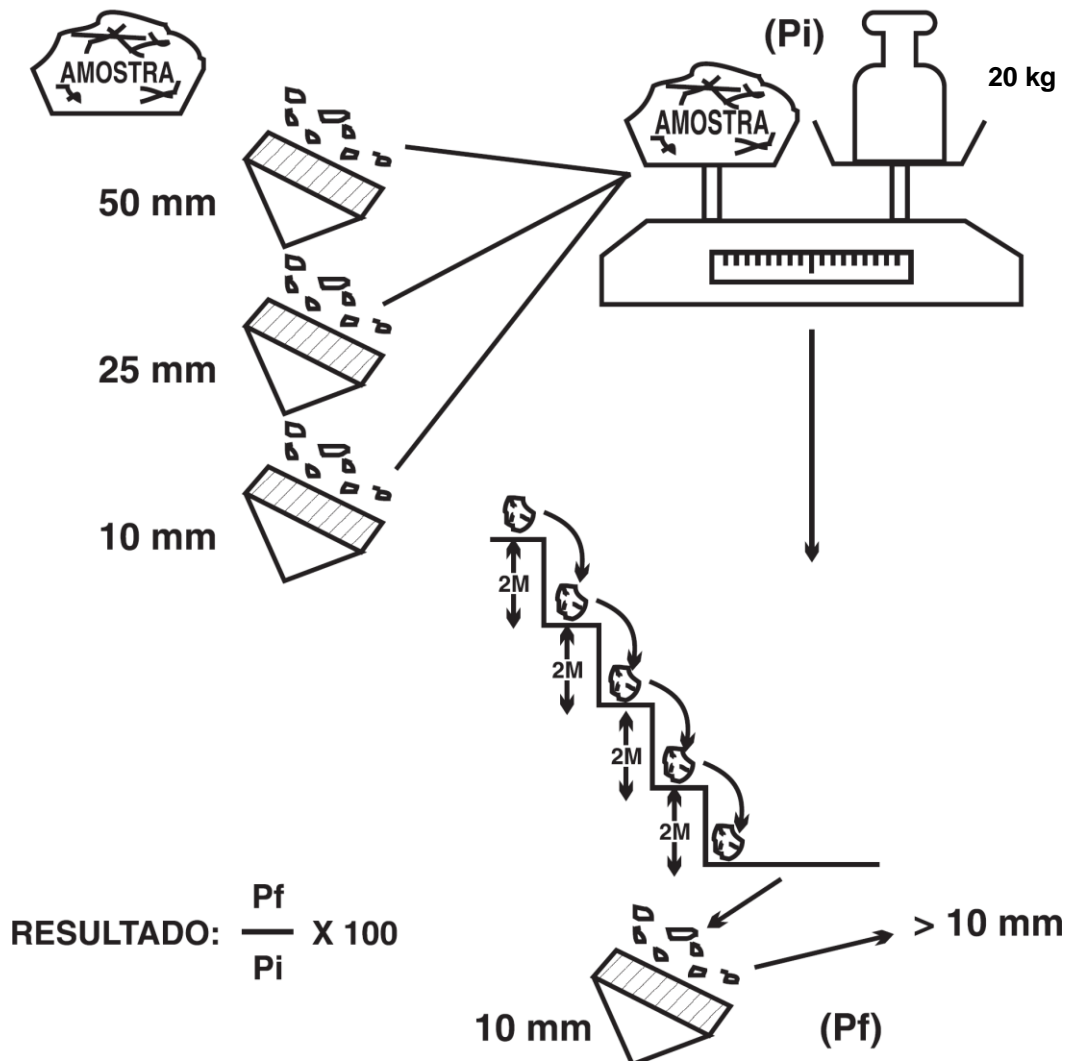
O ensaio exige que se faça a análise da distribuição granulométrica antes e depois da degradação forçada do sinter.

Com base na norma JIS M 8711 os principais procedimentos operacionais são:

- Determinação da distribuição granulométrica do material em peneiras de malhas de 10, 25 e 50mm;
- Composição de uma amostra de 30kg que será denominada peso inicial (Pi) para minério de ferro e 20 kg (Pi) para o sinter, segundo a distribuição granulométrica encontrada;
- Então deve-se submeter a amostra a quatro quedas sucessivas de 2m de altura;
- E por ultimo a realização do peneiramento do material após as 4 quedas em uma peneira de malha de 10mm, tomando-se o peso do retido (Pf).

Abaixo podemos observar na figura 20 um esquema de representação do teste e suas principais etapas:

Figura 20: Esquema do Shatter Test.



Fonte: HONORATO 2005.

Após a realização dos procedimentos operacionais descritos acima, aplica-se a fórmula do resultado descrita na figura 20 e a aprovação se dá de acordo com os seguintes parâmetros: + 10 mm  $\geq$  92% para o minério de ferro e + 10 mm  $\geq$  80% para sínter.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada para a realização dos objetivos propostos, foi otimizada e cumprida com a intenção de avaliar a viabilidade técnica e científica da proposta, visando parametrizar e aperfeiçoar os processos. Foram utilizados os modelos mais adequados e que melhor atendessem as necessidades do projeto, com o objetivo de referenciar cientificamente por meio de informações coerentes, dando suporte para todo o estudo. Para a coleta de dados na intenção de proporcionar maior conhecimento sobre o tema e problema da pesquisa objeto, utilizou-se a pesquisa exploratória, bibliográfica e a in loco, além dos métodos aplicados para a produção e caracterização do sínter.

#### 3.1. Materiais

Os materiais utilizados nesse trabalho foram obtidos por meio da coleta de coprodutos em uma usina integrada com atuação em siderurgia e mineração dominante no portfólio de aços planos. Dentro da geração do volume de resíduos sólidos temos uma diferença nas caracterizações de resíduos úmidos e secos.

Tabela 2: Volume de resíduos gerados na cadeia produtiva de uma usina integrada.

Resíduo	Volume Úmido (t/mês)	Volume Seco (t/mês)
Lama grossa de aciaria	4.721	4.202
Lama fina de aciaria	11.335	8.751
Carepa (laminação tira)	4.117	3.726
Carepa (laminação chapa)	822	735
Carepa (escarfagem)	6.649	6.051
Carepa (lingotamento)	551	517
Pó de cal	3.918	3.910
Pó de dolomito	1.504	1.504
Pó (despoeiramento aciaria)	359	358
Pó (desp. dessulfuração)	97	97
Pó (coletor AF)	3.271	3.140
Lama (AF)	3.580	2.764
Lama (laminação)	239	194
Lama (ENA)	648	222
Pó de decapagem	917	912
<b>Sub total</b>	<b>42.728</b>	<b>37.082</b>
<b>Total</b>	<b>79.810</b>	

Fonte: Autor, 2016.



Onde na tabela 2 podemos observar que o total de resíduos úmidos é equivalente a 42.728 t/mês e o total de resíduos secos chega ao equivalente a 37.082 t/mês, a soma dos dois equivale a um total de 79.810 t/mês de aço bruto.

Dentre os resíduos sólidos apresentados na tabela 2, foram utilizados como matéria prima para a produção do sinter os coprodutos secos, desagregados e sem contaminação de óleo, tais como: Carepa; Lama Fina de Aciaria; Moinha de Carvão; Pó de balão e “Bag House”; sinter de retorno e Pó de cal.

Tabela 3: Composição química da matéria prima utilizada na sinterização

AMOSTRA	Fe (%)	FeO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	P (%)	CaO (%)	Mn (%)
Carepa	52,7	22,3	2,0	1,2	0,4	0,0	4,7	0,6
Lama fina de Aciaria	39,3	17,3	9,6	4,8	1,0	0,1	5,8	0,4
Moinha de Coque	5,4	3,2	14,0	3,4	0,7	0,0	2,5	0,1
Finos de Sinter degradados	34,7	7,2	7,8	1,3	1,4	0,1	13,5	0,3
Pó misto de bag house	26,5	10,0	2,1	1,8	4,7	0,3	22,5	0,9
Sinter feed	66,1	0,0	1,5	1,5	0,6	0,1	0,16	0,7

Fonte: Autor, 2016.

Na tabela 3 acima podemos observar a composição química da matéria prima utilizada na sinterização. Já na tabela 4 podemos observar as proporções de cada material utilizado para a composição da mistura na produção do sinter e o seu respectivo volume em relação ao total recebido da usina integrada.

Tabela 4: Proporções da mistura utilizada na sinterização

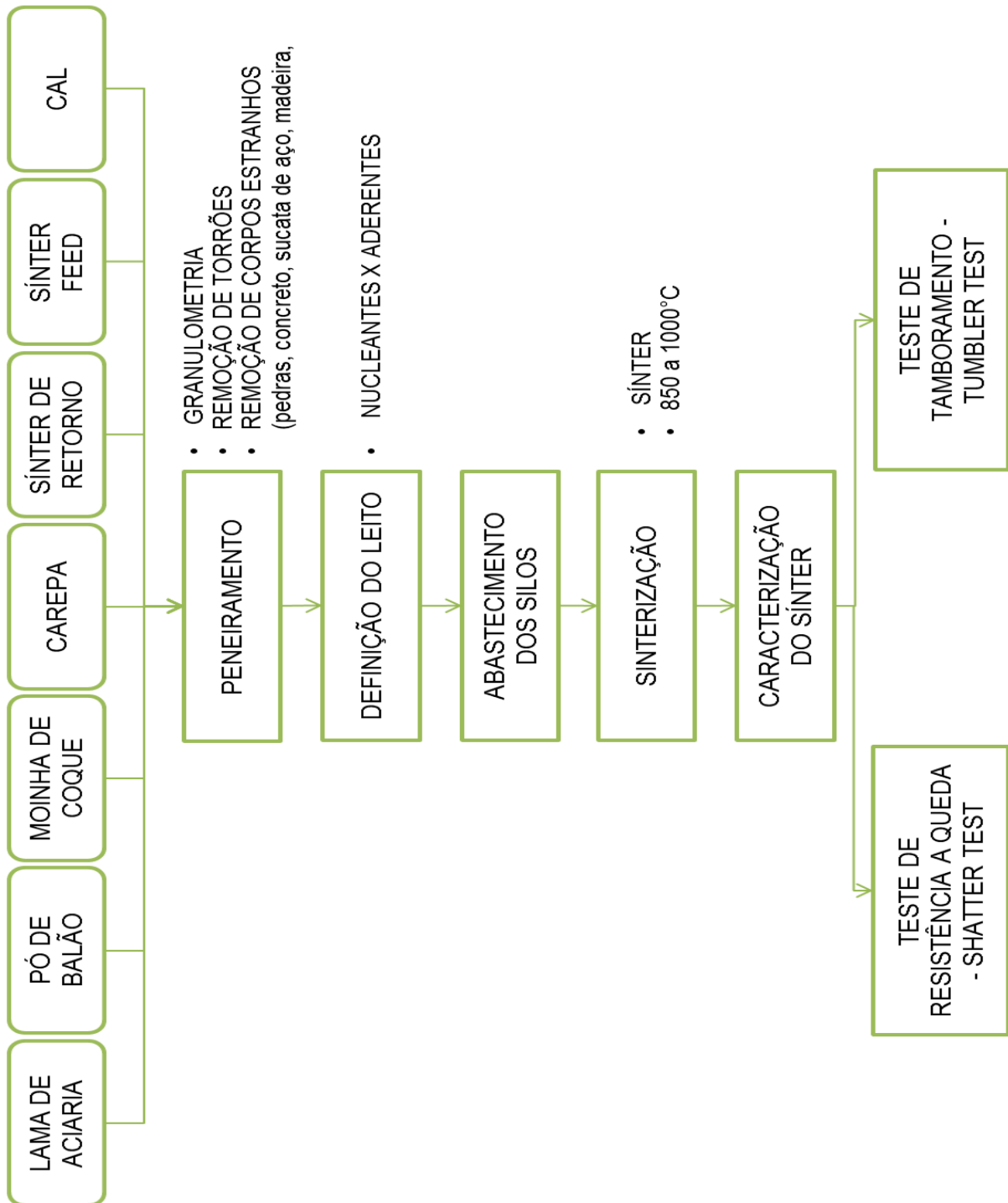
MATÉRIA PRIMA	(%)	Volume (t)
Sinter de retorno (finos de.)	26	23,43
Sinter feed	25,8	22,44
Lama de aciaria	23	19,17
Moinha de coque	5	2,32
Pó de balão + bag house	12	9,76
Cal	5,2	4,08
Carepa	3	2,46
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>83,66</b>

Fonte: Autor, 2016.

### 3.2. Métodos

Para que os objetivos do trabalho fossem atendidos de forma clara e objetiva foi elaborado um fluxograma dos métodos utilizados para a conclusão do trabalho.

Figura 21: Fluxograma dos métodos utilizados.



Fonte: Autor, 2016.

No fluxograma dos métodos utilizados estão demonstrados de forma sucinta os procedimentos utilizados na produção e caracterização do sínter com as devidas etapas envolvidas desde o recebimento da matéria prima, passando pelo processo de aglomeração, produção do coproduto e a sua caracterização.

### **3.2.1. Sinterização**

#### **3.2.1.1. Local e Equipamento**

A sinterização ocorreu na cidade de Sete Lagoas – MG nas dependências da empresa Tecnosulfur, que iniciou suas atividades em 1990 com soluções e tecnologia para o tratamento de metais líquidos em siderurgia, fundições e ferro ligas através do fornecimento de insumos, equipamentos e serviços especializados.

O tipo de equipamento utilizado foi a sinterização real contínua da TCS Sinterização com capacidade de produção de 90.000t de sínter por ano. Abaixo na figura 22 podemos observar o equipamento.

Figura 22: Sinterização contínua da Tecnosulfur.



Fonte: TCS Sinterização, 2015.

As principais características do equipamento são:

- Capacidade de Produção: 90.000 t/ano
- Área útil: 13,056 m<sup>2</sup>
- Largura útil: 1,2m
- Comprimento: 10m
- Abastecimento da Alimentação: 9t/h
- Temperatura de ignição: 850 a 1000 °C.

O equipamento além das características acima possui também o controle do avanço de velocidade da frente de queima que é gerada no forno de ignição através da camada da mistura na esteira.

Figura 23: Esteira de Sinterização

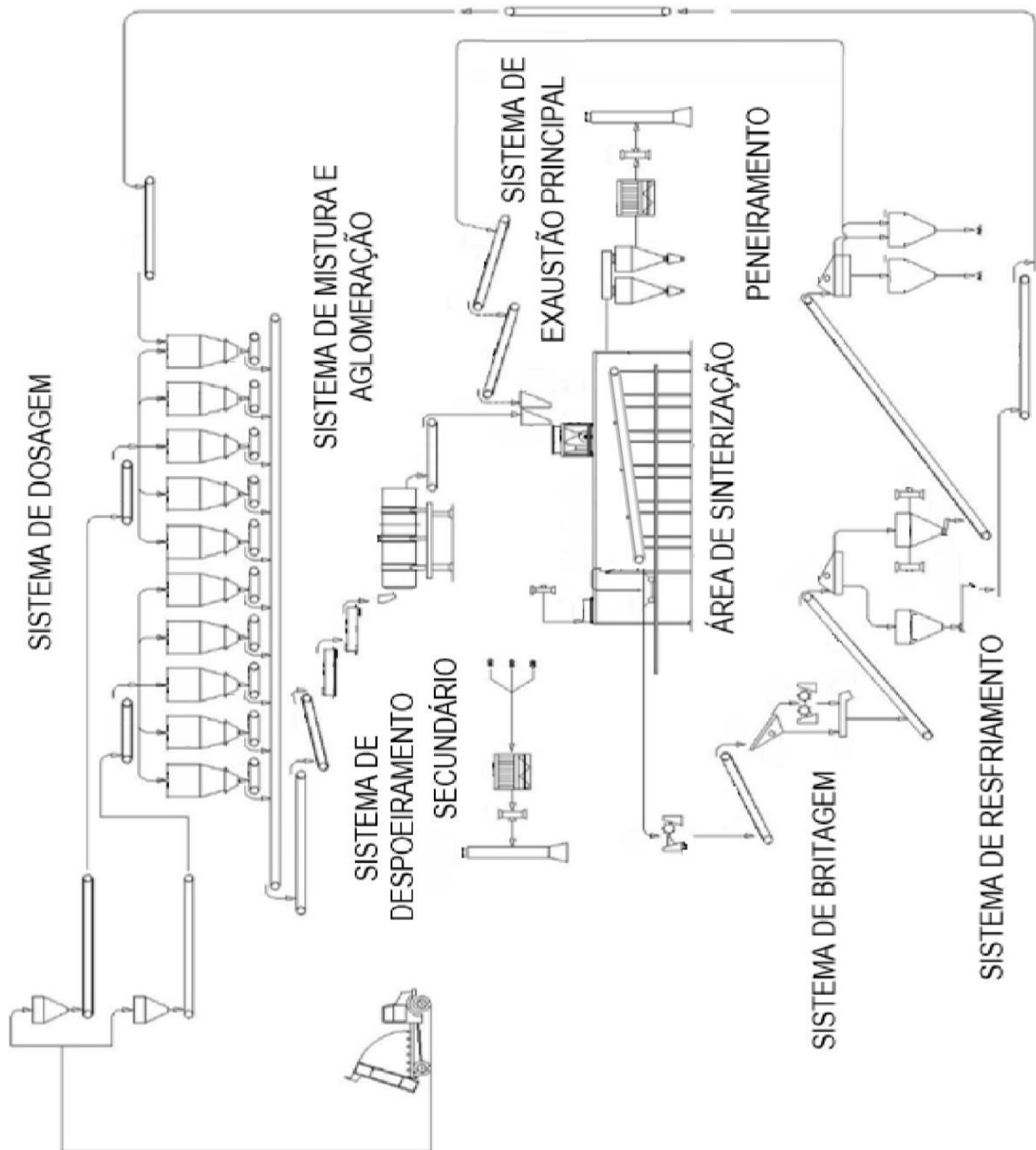


Fonte: TCS Sinterização, 2015

Na figura 24 temos a representação do funcionamento do equipamento, assim como o esquema de orientação do emprego da matéria prima como recebida da usina integrada até a formação do coproduto, ou seja, até a produção do sinter.

Onde podemos observar a representação do processo de sinterização e suas principais características, começando pelo peneiramento e definição do leito de fusão, o abastecimento nos silos, depois aglomeração por meio da sinterização. Onde podemos observar: Dosagem; Umidificação; Carregamento por esteiras; Ignição pela adição de carvão; Progressão da frente de combustão; Vaporização da água e Adesão de partículas metálicas.

Figura 24: Representação do processo de sinterização.



Fonte: TCS Sinterização, 2015

### **3.2.1.2. Sistema de Dosagem**

No sistema de dosagem foi realizado o peneiramento do material com a finalidade de remover parte de possíveis contaminações e adequar a granulometria do material, além de prevenir acidentes devido a possíveis falhas no equipamento durante a sinterização. O material de 100t de resíduos sólidos recebidos demonstrou-se com alto índice de contaminação e por meio do peneiramento foram retirados da mistura; partes de torrões, pedras, concreto, sucata de aço, madeiras e sacos plásticos.

Após o peneiramento foi realizada a determinação do leito de fusão em função da quantidade de matéria prima recebida equivalendo a 83,66t. O objetivo desta etapa foi o máximo consumo de “sinter feed” e finos degradados, mantendo a relação de nucleantes/aderentes em 2,5 para ser mantida a permeabilidade do leito durante a sucção de ar. É importante ressaltar que:

- Foi definido um percentual de teor de carepa em 3% para evitar a emissão de fumos na chaminé.
- A cal foi introduzida para facilitar a escorificação das impurezas e para promoção de maior coesão entre os grãos.
- A moinha de coque foi o combustível sólido aplicado ao processamento, visando a geração de calor a partir da ignição e reação exotérmica permitindo o controle da permeabilidade da carga.

Depois dos procedimentos acima, o abastecimento nos silos foi iniciado e a matéria prima foi carregada através das esteiras transportadoras para o tambor de aglomeração. Lembrando que o abastecimento e suas proporções foram realizadas de acordo com as proporções de resíduos sólidos definidos na Tabela 4.

### **3.2.1.3. Mistura e Aglomeração**

Para que houvesse a aglomeração dos resíduos sólidos foi adicionado de 6% a 8% de água em um misturador tipo tambor e iniciado seu giro por 10 minutos.

Após o giro de 10 minutos foi obtida uma mistura homogênea que foi encaminhada para o leito através de esteiras transportadoras.

A mistura granulada foi lançada na entrada do leito sobre uma grelha permeável a passagem de ar quente dando preferência ao modo de controle manual da temperatura de trabalho parametrizada através da regulagem dos queimadores objetivando valores entre o início e final do processamento de 850 a 1000°C.

### **3.2.2. Caracterização Mecânica do Sínter Produzido**

#### **3.2.2.1. Shatter Test**

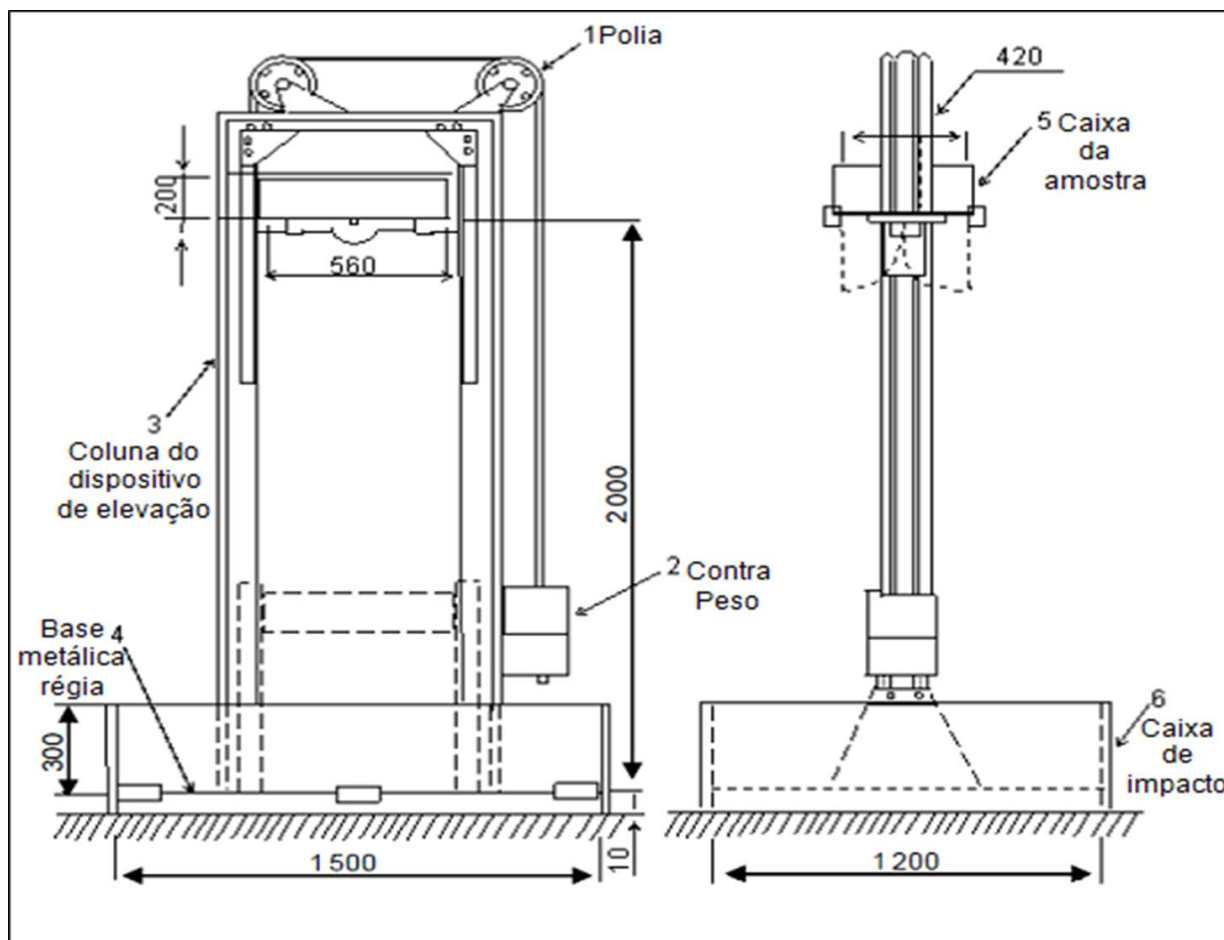
O teste foi realizado nas dependências da empresa Minas Logística localizada na cidade de Prudente de Morais – MG com o objetivo de avaliar a resistência mecânica do sínter produzido. Foi de suma importância uma vez que o sínter se degrada durante a sua movimentação e a finalidade do teste é medir a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

A realização do teste foi com base na norma ABNT NBR 10633 - Sínter de minério de ferro - Determinação da resistência à queda. Cujas finalidades englobam um dos vários métodos de ensaio que têm sido desenvolvidos para medir diversos parâmetros físicos. Dessa forma a norma especifica um método para a determinação da resistência à queda de sínters.

Na figura 25 podemos observar as características do aparelho utilizado para a realização do Shatter test. E logo após foram descritos os procedimentos, materiais e aparelhagem utilizados na realização do mesmo, tais como:

- **Caixa da amostra:** possui 560 mm de comprimento, 420 mm de largura e 2 m de altura, confeccionada em chapa de aço resistente à abrasão. O fundo da caixa é constituído de uma porta longitudinal, com duas bandas, construída de forma a impedir perda de amostra por qualquer de seus lados quando fechada. Essa porta é provida de dispositivo externo para permitir sua abertura instantaneamente;

Figura 25: Características do aparelho utilizado no Shatter Test.



Fonte: Adaptado da NBR ABNT 10633.

- **Caixa de impacto:** com 1 500 mm de comprimento, 1 200 mm de largura e 300 mm de altura, confeccionada em chapa metálica rígida, com espessura mínima de 10 mm. Uma das laterais é articulada para possibilitar a retirada de material após cada queda. A base da caixa é substituída quando sua espessura é reduzida em 3 mm, em qualquer ponto de impacto na queda da porção de ensaio;
- **Dispositivo de elevação:** constituído de coluna, polias e contrapeso, para a elevação e o abaixamento da caixa de amostra a uma altura mínima de 2 m, medida entre o fundo da caixa da amostra e a caixa de impacto;
- **Dispositivo de pesagem:** capaz de pesar a massa a ser determinada com uma sensibilidade de 1/1 000;



- **Peneiras:** com aberturas quadradas de 50 mm, 38 mm, 25 mm e 9,5 mm, conforme ABNT NBR ISO 3310-1.

Na figura 26 abaixo, temos a representação do aparelho utilizado para a realização do Shatter test. Suas principais características foram explanadas acima.

Figura 26: Aparelho utilizado no ensaio de queda.

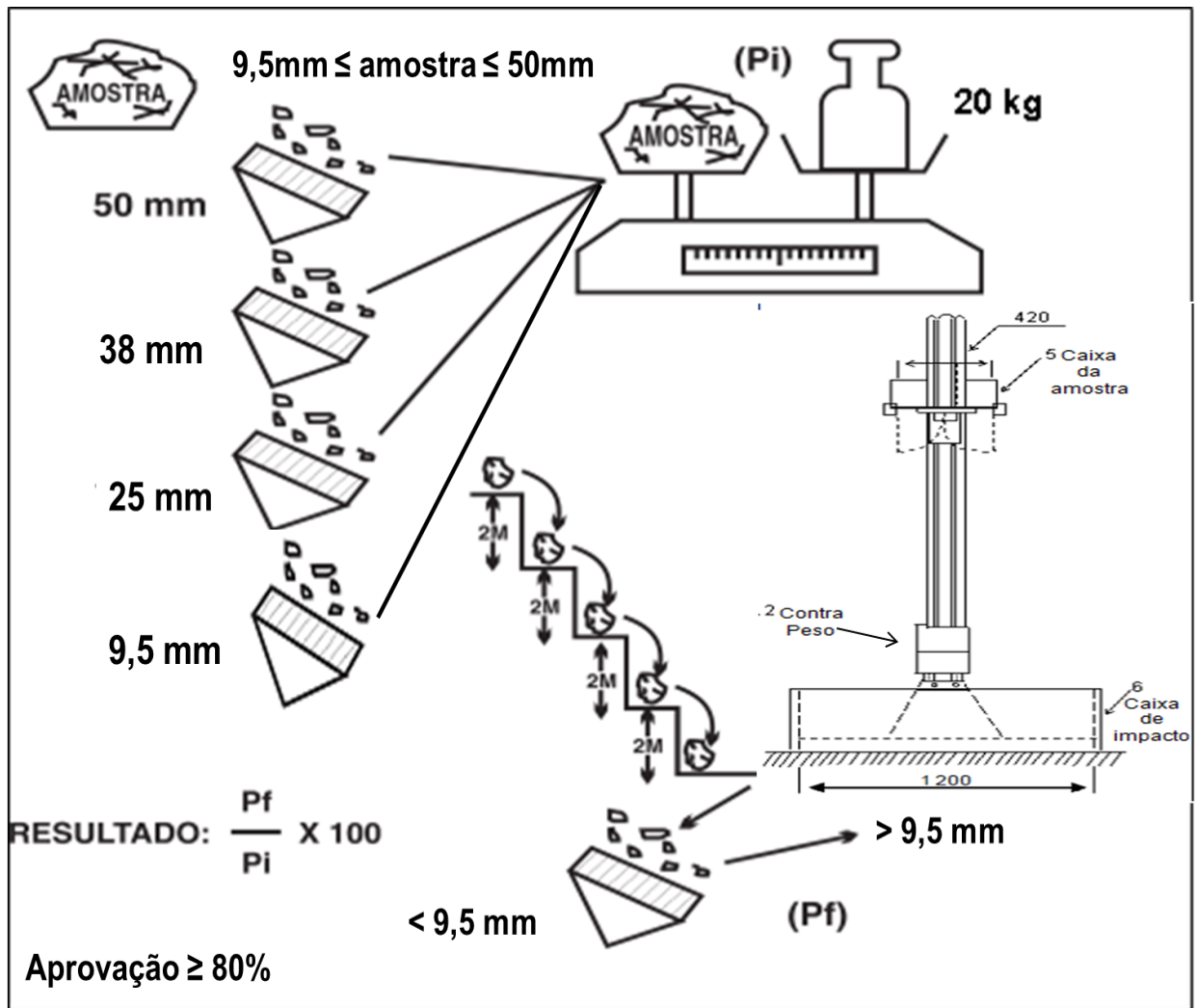


Fonte: Minas Logística, 2016.

Abaixo na figura 27 podemos observar a descrição das principais etapas para a realização do shatter test, tais como: Amostragem, preparação da amostra, porções de ensaio e procedimentos operacionais realizados, tais como:

- Foi realizada a separação das amostras como base na norma ABNT NBR ISO 3082, Minérios de ferro – Procedimentos de amostragem e preparação de amostras, onde foi composta uma amostra de 80kg de sinter;
- Secou-se a amostra até a massa constante a  $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  e resfriada até a temperatura ambiente, antes da preparação das porções de ensaio. Lembrando que a massa constante é alcançada quando a diferença de massa entre duas medidas subsequentes for menor do que 0,05 % da massa inicial da amostra de ensaio.

Figura 27: Esquema para a realização do Shatter Test



Fonte: Autor, 2016.

- Determinou-se a distribuição granulométrica do material de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4701. Para tal foi realizado o peneiramento da amostra de ensaio seca nas peneiras de abertura 50 mm, 38 mm, 25 mm e 9,5 mm e foram desprezados o material acima de 50 mm e abaixo de 9,5 mm;
- Pesou-se cada fração e foram compostas quatro porções de ensaio, de 20 kg ± 0,2 kg cada, na faixa granulométrica de 9,5 mm a 50 mm, proporcionalmente à distribuição granulométrica encontrada.
- Tomou-se uma das porções de ensaio de 20 kg preparadas anteriormente em amostras e anotou-se sua massa (Pi);
- Colocou-se a porção de ensaio na caixa de amostra, nivelando sua superfície.

- Elevou-se a caixa até a altura de 2 000 mm, ou seja, 2m;
- Abriu-se rapidamente o fundo da caixa para que toda a porção de ensaio caísse de uma só vez sobre a caixa de impacto;
- Todo o material foi recolhido;
- Os passos anteriores foram repetidos por mais três vezes e a porção de ensaio recolhida foi peneirada na peneira de abertura de 9,5 mm, de acordo com a ABNT NBR ISO 4701;
- O Índice de resistência à queda (IQ) foi expresso como a razão percentual entre a massa da fração retida na peneira de 9,5 mm denominada peso final (Pf) e a massa inicial da porção de ensaio (Pi).
- O resultado do Shatter test é adequado quando o percentual obtido é maior ou igual a 80%, ou seja, o índice de resistência a queda tem que ser  $\geq 80\%$ .
- Quando o índice de resistência a queda é  $\geq 80\%$  o teste deve ser repetido somente duas vezes. Se o índice for  $< 80\%$  é necessário 3 repetições.

### **3.2.2.2. Tumbler Test**

O teste foi realizado nas dependências da empresa Minas Logística localizada na cidade de Prudente de Moraes – MG, para avaliação da resistência mecânica do sínter produzido, além de medir a resistência do material ao tamboramento quando submetido ao atrito.

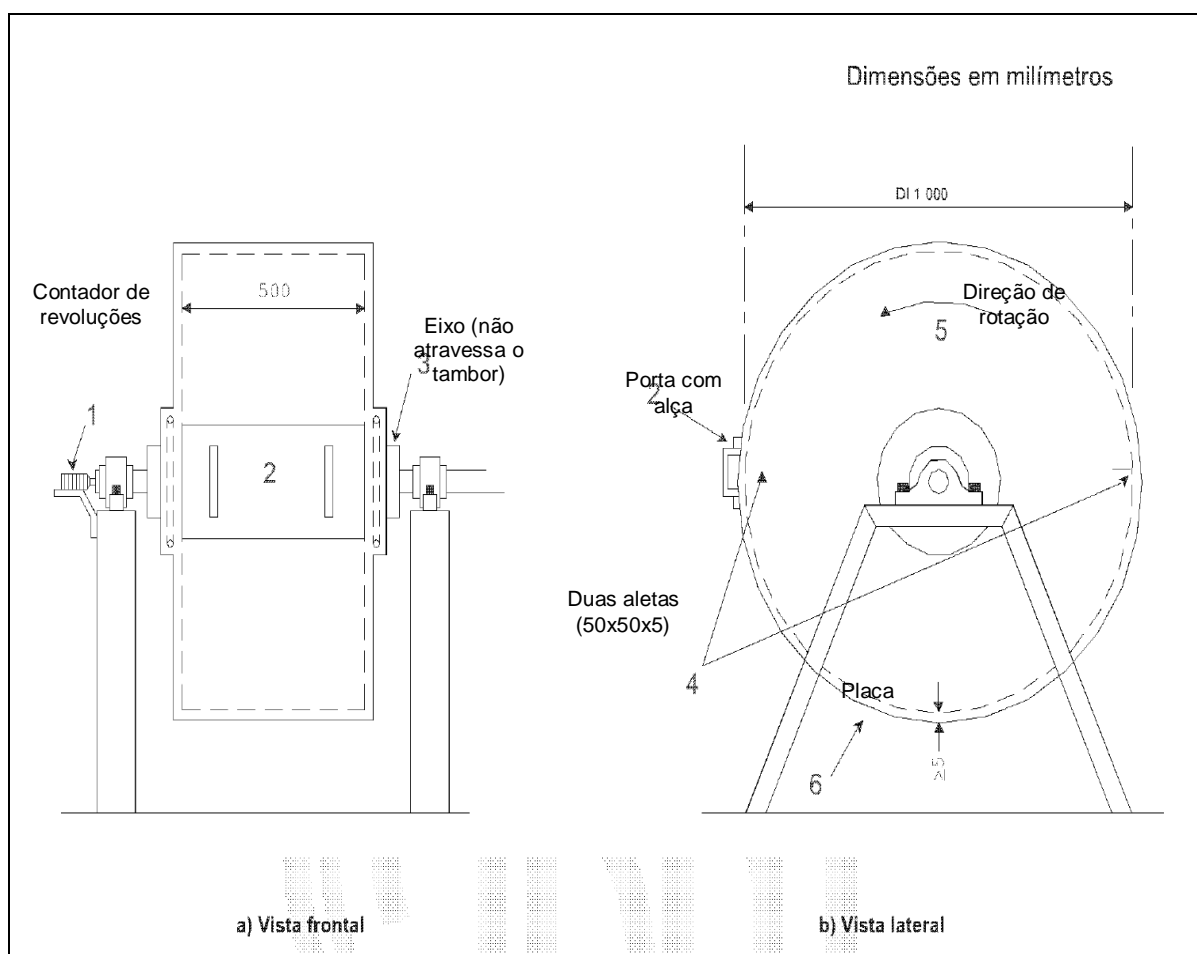
O objetivo do teste foi avaliar a degradação do material ao longo do processo, o quanto o sínter ficou quebradiço e perdeu na forma de fino. Pois esta degradação prejudica a permeabilidade da carga no alto-forno, diminuindo assim a produtividade do processo.

A realização do teste foi com base na norma ABNT NBR ISO 3271 - Minério de ferro como insumo para alto-forno e redução direta - Determinação dos índices de tamboramento e abrasão.

Esta norma especifica um método para obter uma medida relativa para avaliar a resistência a degradação de tamanho por impacto e abrasão.

Na figura 28 podemos observar as características do aparelho utilizado para a realização do tumbler test. E logo após foram descritos os procedimentos, materiais e aparelhagem utilizados na realização do mesmo.

Figura 28: Características do aparelho utilizado no Tumbler Test.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR ISO 3271.

- **Tambor:** fabricado com placa de aço com espessura mínima de 5 mm, com diâmetro interno de 1000 mm e comprimento interno de 500 mm. Duas aletas de aço igualmente espaçadas e com formato em L, com superfície horizontal de 50 mm x altura de 50 mm x espessura de 5 mm e comprimento de 500 mm solidamente montadas no sentido longitudinal, dentro do tambor, por soldagem. Cada aleta foi fixada de forma que apontasse para o eixo do tambor, com sua perna de fixação apontando na direção oposta a da rotação,

proporcionando assim uma saliência livre e desobstruída para levantar a amostra. A porta foi construída de forma a se encaixar na abertura do tambor, formando uma superfície interna lisa.

- **Equipamento de acionamento do tambor:** capaz de assegurar que o tambor atinja velocidade plena em uma revolução, gire a uma velocidade constante de 25 r/min e pare em uma revolução. O equipamento tem um contador de revoluções e um dispositivo de parada após um número predeterminado de revoluções;

Na figura 29 temos a representação do aparelho utilizado para a realização do tumbler test.

Figura 29: Aparelho utilizado no ensaio de tamboramento.

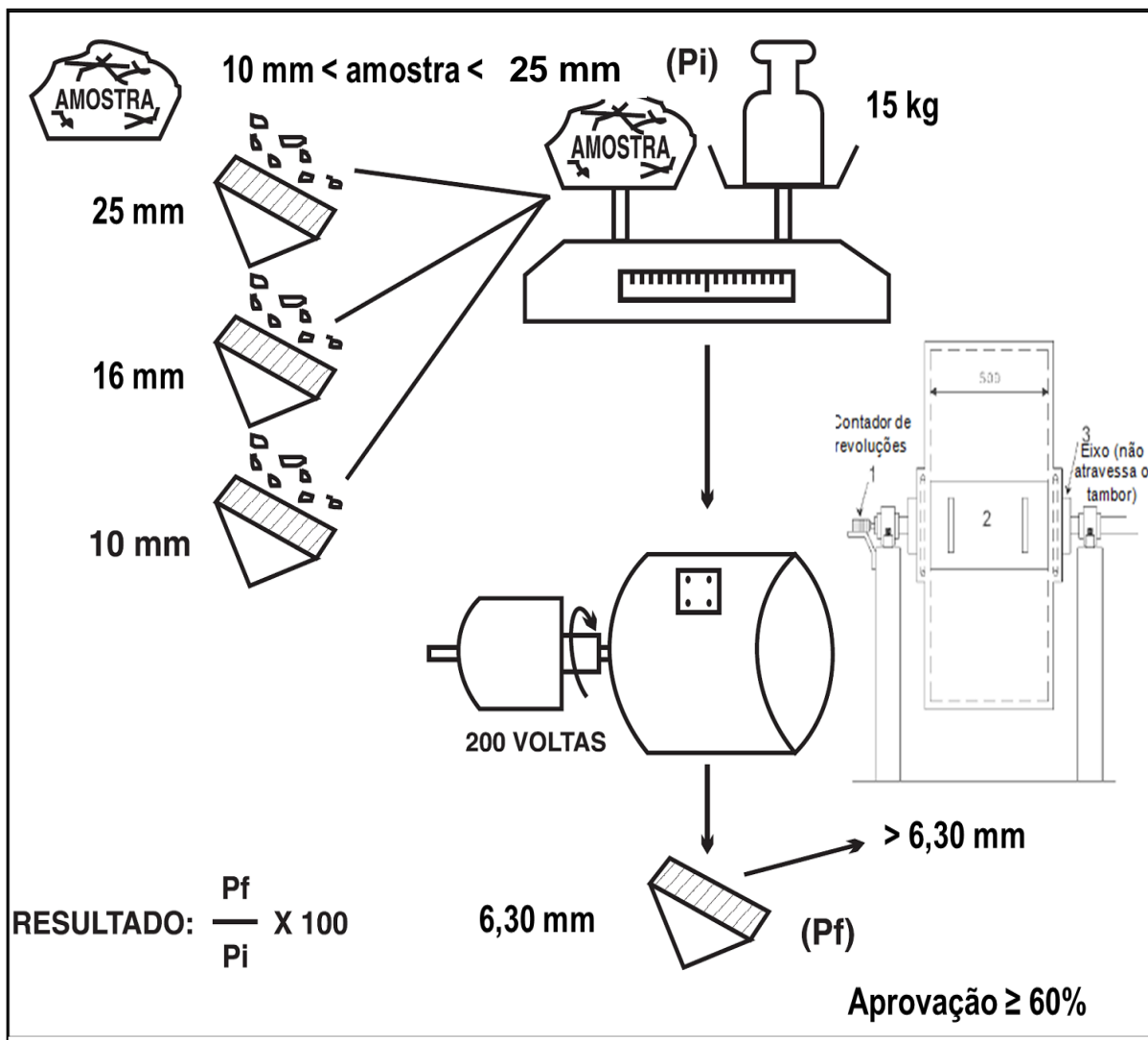


Fonte: Minas Logística, 2016.

- **Peneiras de ensaio:** estão em conformidade com as ISO 3310-1 ou ISO 3310-2 e com aberturas quadradas com os seguintes tamanhos nominais: 6,30 mm;
- **Dispositivo de pesagem:** capaz de pesar a amostra e as porções de ensaio com uma sensibilidade de 111 000.

Abaixo na figura 30 podemos observar a relação das principais etapas para a realização do tumbler test, tais como: Amostragem, preparação da amostra, porções de ensaio e procedimentos operacionais realizados.

Figura 30: Esquema para a realização do Tumbler Test.



Fonte: Autor, 2016.

- A amostragem e a preparação da amostra de ensaio foram realizadas de acordo com a ABNT NBR ISO 3082. Onde a faixa granulométrica para sínters é de - 25,0 mm + 10,0 mm, ou seja, o material acima de 25,0 mm e abaixo de 10,0 mm foram descartados;
- Foi obtida uma amostra do material bitolado de 60 kg, em base seca.

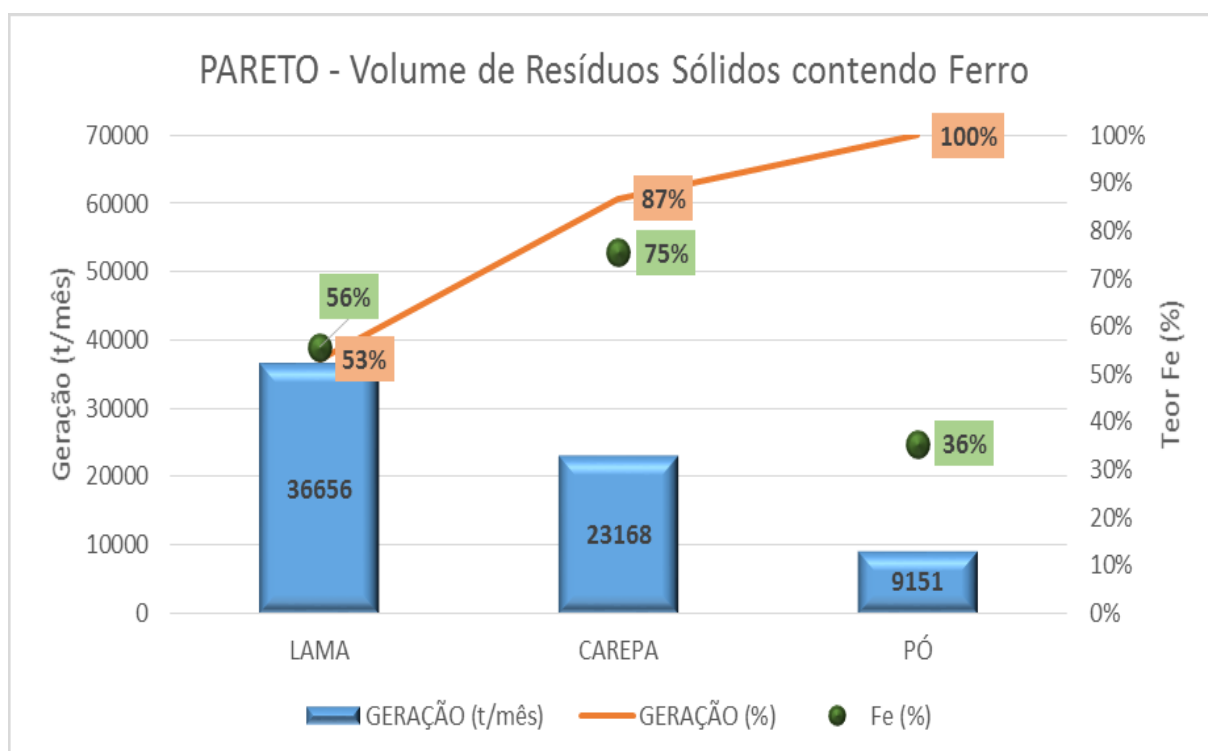
- As porções de ensaio foram obtidas a partir da amostra usando os métodos de divisão fornecidos na ABNT NBR ISO 3082;
- Onde as amostras de ensaio foram pesadas e separadas em 4 frações por peneiramento nas peneiras de 25,0 mm, 16,0mm e 10,0mm. Cada uma com massa  $15 \text{ kg} \pm 0,15 \text{ kg}$ .
- Tomou-se aleatoriamente uma das porções de ensaio de 15kg onde foi registrado a sua massa e denominado de peso inicial ( $P_i$ ) e então colocado dentro do tambor.
- A porta foi fechada firmemente e o tambor girou a  $25 \text{ r/min} \pm 1 \text{ r/min}$  por um total de 200 revoluções.
- Foi utilizado uma massa de vidraceiro para selar a porta, para prevenir a perda de finos do tambor.
- Então o tambor parou e a porta manteve-se fechada por pelo menos 2 min para permitir que a poeira assentar-se antes de ser aberta
- O material foi cuidadosamente removido do tambor e peneirado manualmente na peneira de 6,30 mm de acordo com a ABNT NBR ISO 4701. Foi determinada e registrada a massa da fração retida na peneira de 6,30 mm, que foi denominada de peso final ( $P_f$ ).
- O índice de tamboramento, (IT) foi expresso como a razão percentual entre a massa da fração retida na peneira de 6,3 mm da porção de ensaio tamborada ( $P_f$ ) e a massa inicial da porção de ensaio como pesada e colocada no tambor ( $P_i$ ).
- O resultado do tumbler test é adequado quando o percentual obtido é maior ou igual a 60%, ou seja, o IT não pode ser menor que 60%. Se for menor deve-se repetir o procedimento.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a realização do processo de aglomeração por meio da sinterização, foi observado que no sistema de dosagem após a tomada de decisão em relação aos constituintes a serem aplicados, que a lama com 56% de ferro era a mais representativa em relação aos demais, levando em consideração o teor de ferro e sua geração mensal.

Na figura 31 podemos observar a representação da geração mensal de resíduos sólidos da usina integrada e a média ponderada do teor de ferro.

Figura 31: Representação gráfica do volume de resíduos sólidos gerados mensalmente na usina integrada com teor de ferro.



Fonte: CARDOSO, 2016.

Foi necessário a redução do teor de cal devido a aderência da mistura no silo pela baixa velocidade de alimentação do equipamento em 9t/h. Foi notado o excesso de calor e formação de cascão na grelha sendo necessário a forte redução do teor da moinha de coque servindo como combustível ao processamento. Esta condição pode ser explicada apenas pela condição de contaminação dos resíduos



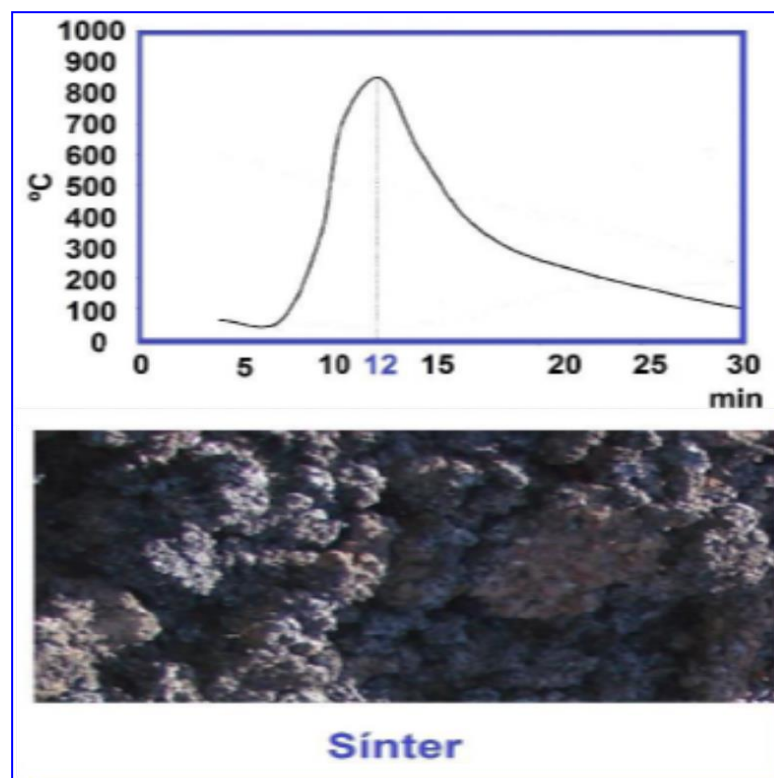
sólidos fornecidos, acreditando que a lama de aciaria continha mistura com lama de alto forno.

As temperaturas entre o início e final do processamento variaram de 850° a 978°C. O exaustor responsável pela sucção se manteve de 20 a 30% com vazão de ar adequada para atravessar o leito de sinterização garantindo a permeabilidade. No início do processo, o leito de sinterização apresentou a menor permeabilidade a passagem do ar de sucção com a carga completamente úmida.

A permeabilidade da carga foi aumentando com a passagem dos gases quentes ocorrendo a inflexão positiva da curva de temperatura. A máxima temperatura é determinada com a chegada da frente de combustão, com o tempo na casa dos 12 minutos como podemos observar na figura 32.

Posteriormente é observada a inclinação negativa da curva indicando o resfriamento do bolo de sínter para a maior permeabilidade da carga devido a formação de poros pela a queima da moinha de carvão.

Figura 32: Média da temperatura da mistura durante a sinterização.



Fonte: Adaptado de CARDOSO, 2016.

Após a realização da sinterização como podemos observar na figura 33, obteve-se 45t de sínter classificados com granulometria de 15 a 35mm apresentando fração fina de 4 a 15mm. Por inspeção visual, foi constatado aparência de elevado nível de fusão na superfície do sínter, não sendo perceptível a determinação de excesso de poros que pudesse comprometer a aplicação do mesmo. Lembrando que a quantidade de sínter produzido é correspondente a 45t para 83,66t de matéria prima aplicada.

Figura 33: Características do sínter produzido



Fonte: Autor, 2016.

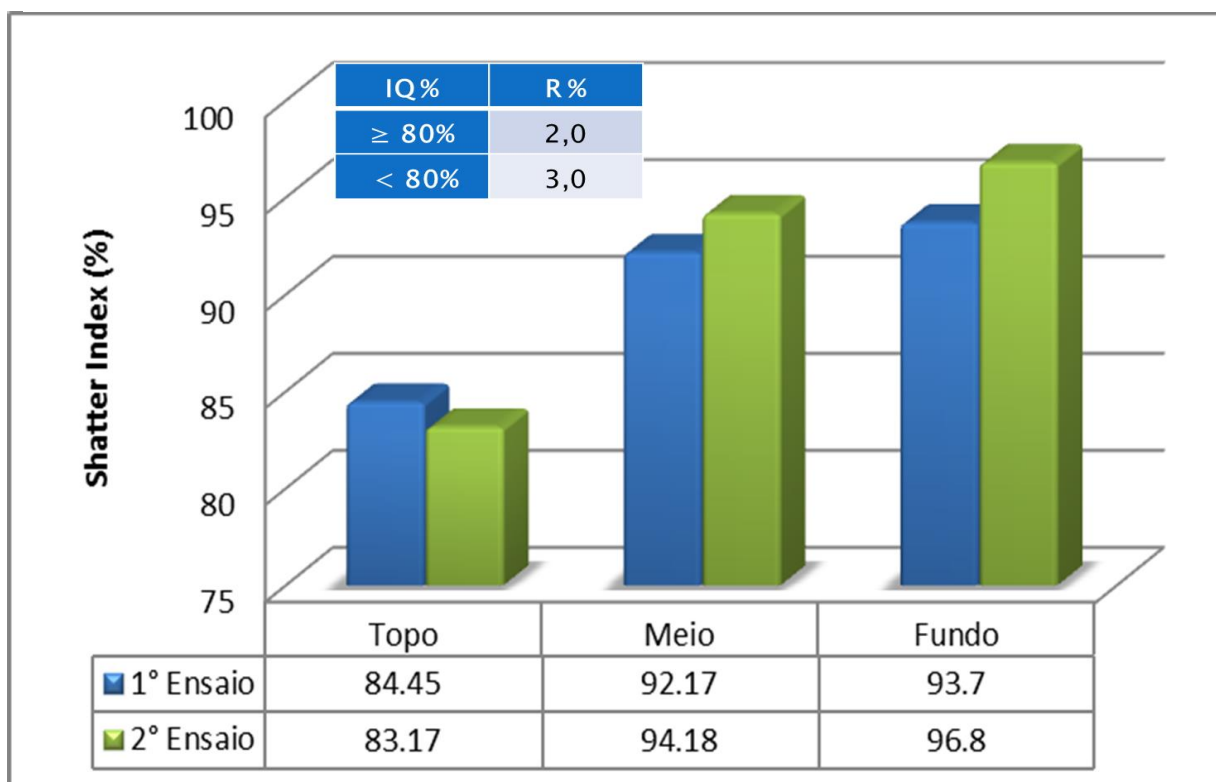
Depois do processo as amostras de sínter foram coletadas sobre as esteiras de sinterização e submetidas a avaliação das suas propriedades mecânica. Elas foram retiradas para a caracterização da resistência mecânica por meio dos testes de Shatter e Tumbler, visando avaliar a qualidade do sínter produzido.

Para a realização do Shatter a amostra seca foi peneirada nas peneiras de abertura 50 mm, 38 mm, 25 mm e 9,5 mm e foram desprezados o material acima de

50 mm e abaixo de 9,5 mm. Após o peneiramento as amostras foram pesadas e compostas em quatro porções de ensaio de 20 kg cada.

Uma porção de ensaio denominada de peso inicial (Pi) foi colocada na caixa da amostra, elevada a 2 m de altura e deixada cair sobre a caixa de impacto. Esta operação foi repetida por mais três vezes. Após a quarta queda, a amostra foi peneirada em uma peneira de 9,5 mm e a resistência à queda foi calculada como a razão percentual entre a massa da fração retida na peneira de 9,5 mm (Pf) e a massa inicial da porção de ensaio (Pi). O índice de resistência a queda encontrado foi acima dos a 80% exigidos pela norma ABNT NBR 10633.

Figura 34: Avaliação da resistência mecânica do Sínter no 1° e 2° ensaio – Shatter Test



Fonte: Autor, 2016.

Podemos observar na figura 34 os valores obtidos nos ensaios para o topo, meio e fundo do leito da sinterização e que estão de acordo com a metodologia aplicada. Onde temos:

- O índice de resistência a queda (IQ) acima dos 80% tanto para topo, meio e fundo do leito da sinterização para os ensaios realizados;

- O teste foi realizado apenas duas vezes devido ao percentual de repetitividade que deu acima de 80%.
- O teste foi realizado 2 vezes para topo, meio e fundo em um total de 6 ensaios.

Para a realização do Tumbler Test uma amostra de base seca foi peneirada nas peneiras de abertura 25 mm, 16 mm e 10mm, onde foram desprezados o material acima de 25 mm e abaixo de 10 mm. Após o peneiramento as amostras foram pesadas e compostas em quatro porções de ensaio de 15 kg cada. Uma das porções foi escolhida aleatoriamente e colocada dentro do tambor para a realização do teste.

A porta foi fechada firmemente e uma massa de vidraceiro foi utilizada para selar devidamente, com o objetivo de prevenir a perda de finos durante o processo. O tambor girou a 25 r/min por um total de 200 revoluções. Então parou e a porta manteve-se fechada por pelo menos 2 minutos antes de ser aberta para permitir que a poeira assentar-se.

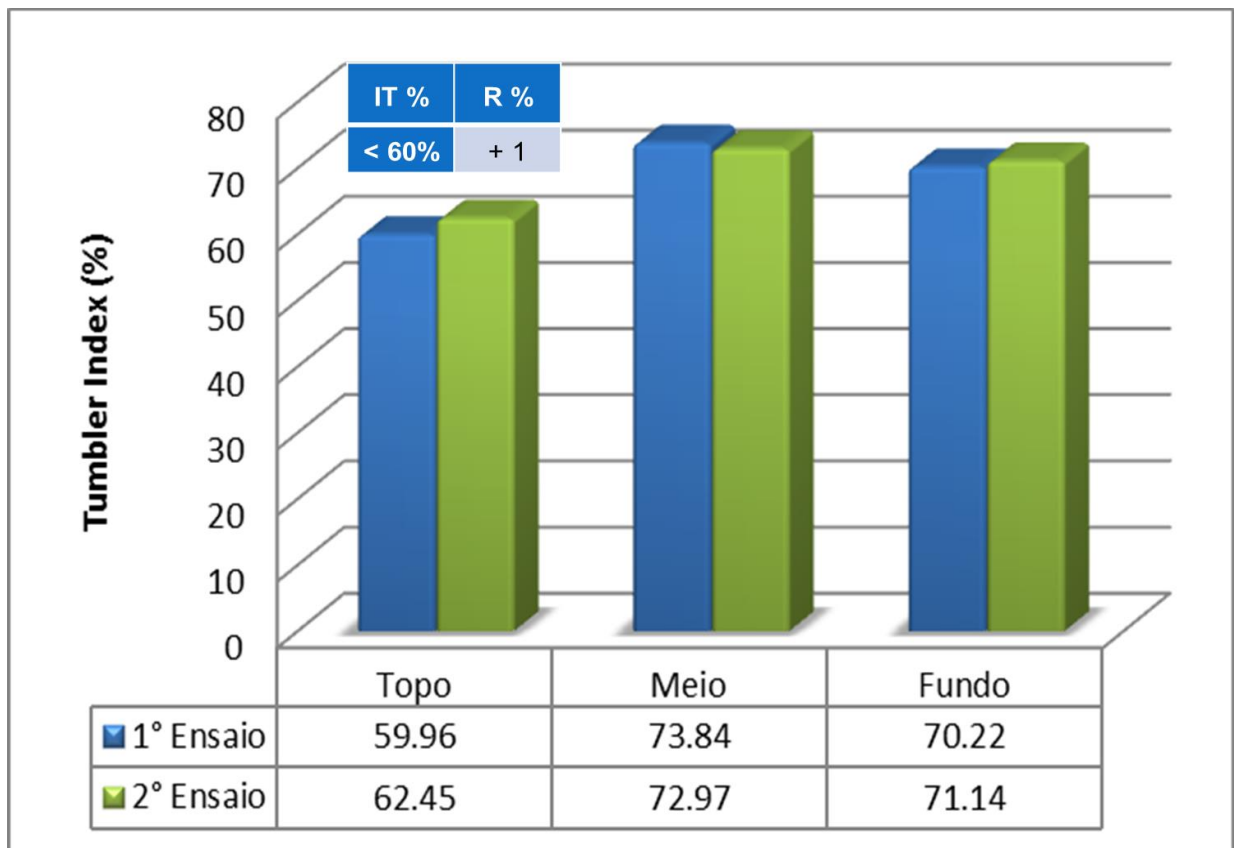
O material foi cuidadosamente removido do tambor e peneirado em uma peneira de 6,30 mm e o índice de tamboramento foi calculado como a razão percentual entre a massa da fração retida na peneira de 6,30 mm denominada de peso final (Pf) e a massa inicial da porção de ensaio (Pi). O índice de tamboramento encontrado foi maior que 60% exigido pela norma ABNT NBR ISO 3271.

Podemos observar na figura 35 os valores obtidos nos dois ensaios, onde são demonstrados os valores do topo, meio e fundo do leito da sinterização e que estão de acordo com a metodologia aplicada. Onde temos:

- O índice de tamboramento (IT) acima dos 60% no 1º ensaio para meio e fundo e no 2º ensaio para topo, meio e fundo.
- O índice de tamboramento (IT) abaixo dos 60% exigidos pela norma no 1º ensaio para topo.
- O ensaio foi realizado duas vezes devido o percentual abaixo dos 60% no 1º ensaio.

- O teste foi realizado 2 vezes para topo, meio e fundo em um total de 6 ensaios.

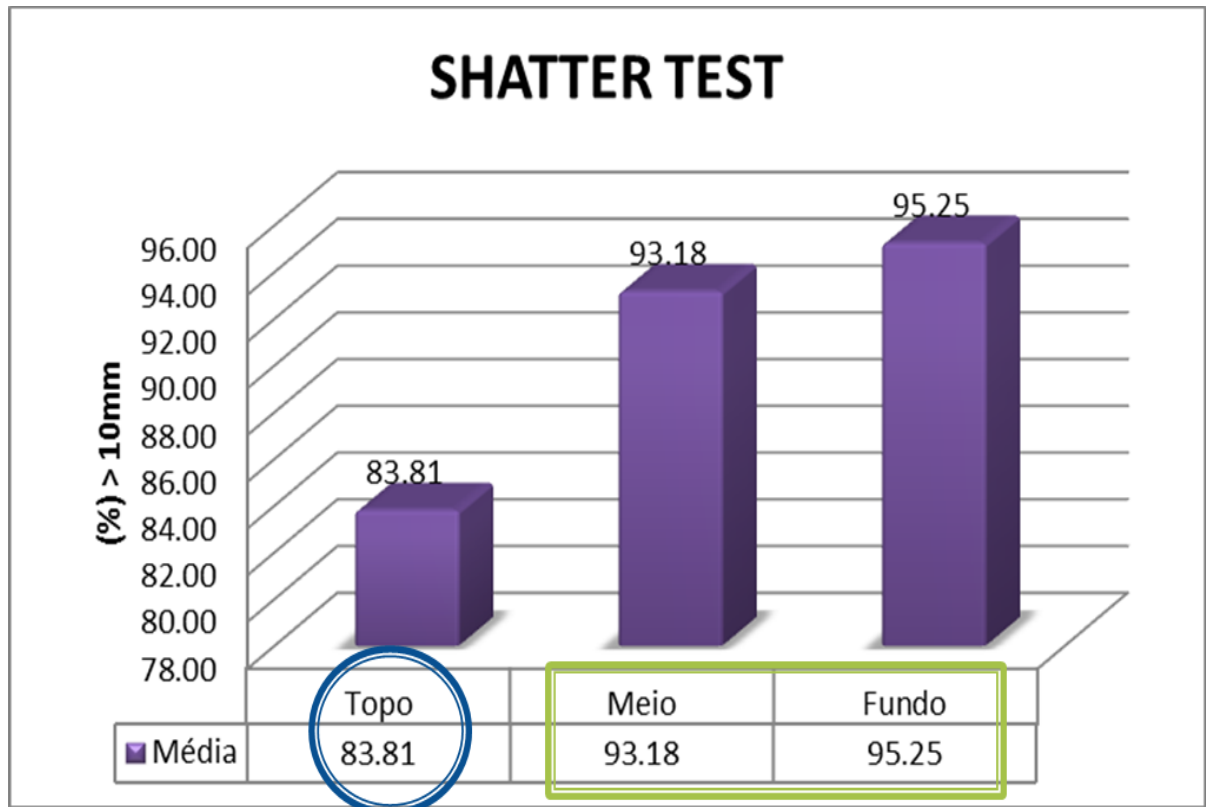
Figura 35: Avaliação da resistência mecânica do Sínter no 1° e 2° ensaio – Tumbler Test



Fonte: Autor, 2016.

Foi realizado a média aritmética dos resultados obtidos nos ensaios e foi observado uma pequena variação da resistência mecânica tanto para o Tumbler como para Shatter em relação ao topo para o meio e fundo como demonstra a figura 36, onde temos a representação da qualidade do sínter produzido segundo os percentuais exigidos nas normas.

Figura 36: Qualidade do Sínter produzido– Shatter Test



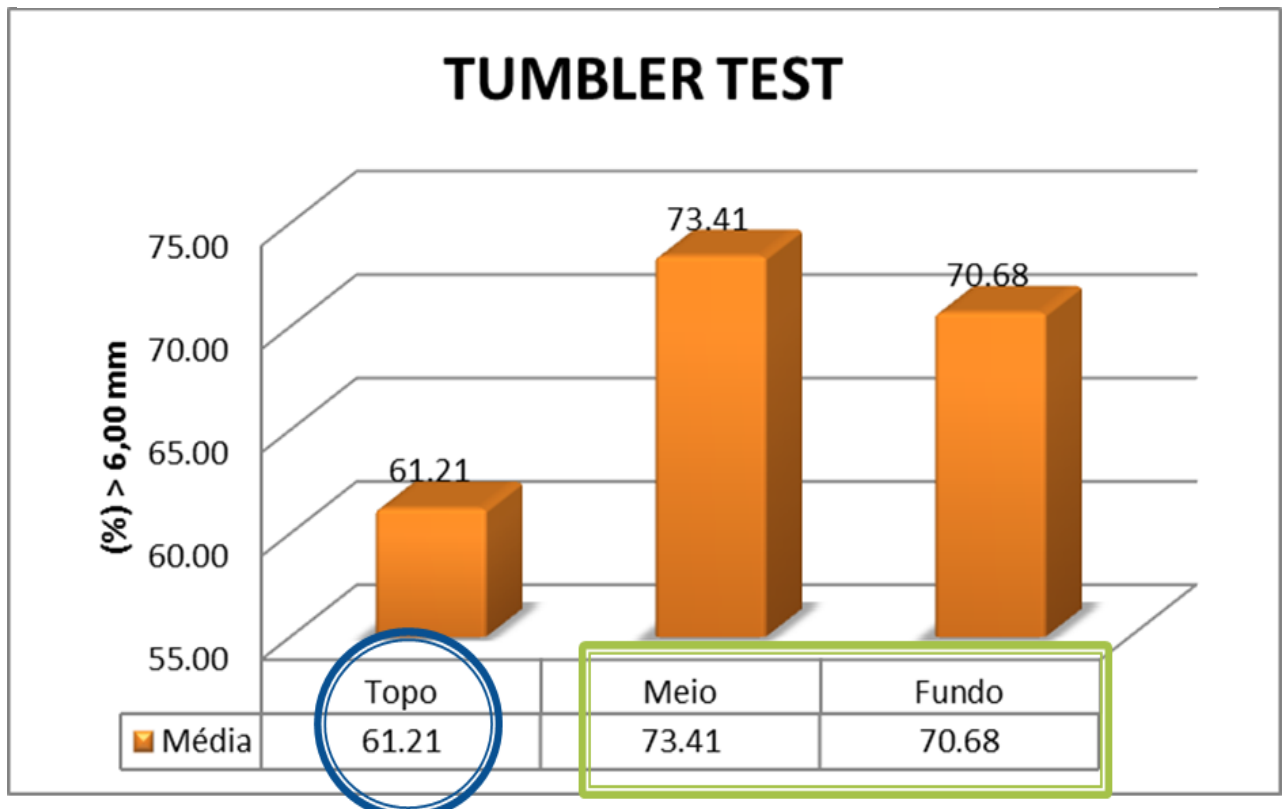
Fonte: Autor, 2016.

Apesar dessa variação o sínter produzido tanto para Shatter como para o Tumbler encontram-se acima dos percentuais exigidos pelas normas, nos remetendo a um sínter de adequada qualidade para a utilização em alto-forno na produção do aço.

O índice de resistência a queda e o índice de tamboramento do sínter produzido utilizando resíduos sólidos siderúrgicos ficaram acima dos 80% e 60% respectivamente.

A média do índice de resistência a queda em relação a topo, meio e fundo encontra-se e um valor aproximado de 90,75% e para o índice de tamboramento foi encontrado uma média de 68,43%, nos remetendo a um sínter com qualidade adequada segundo o grau de aceitação

Figura 37: Qualidade do Sínter produzido – Tumbler Test



Fonte: Autor, 2016.

Observa-se que por meio dos testes realizados foi possível a avaliação da resistência mecânica do sintér produzido e comprovada a adequada qualidade do coproduto constituído de resíduos sólidos siderúrgicos para utilização como matéria prima.

Para a caracterização da resistência mecânica do sintér produzido foi necessário a interpretação das normas ABNT NBR 10633 e a ABNT NBR ISO 3271. Essa interpretação foi de suma importância para a aplicação do Tumbler e do Shatter Test, assim como na elaboração de um guia simplificado dos procedimentos para a execução dos testes.

O objetivo do guia é orientar e servir de apoio para os profissionais que lidam diretamente com a aplicação desses testes, visto que as normas direcionadas aos procedimentos não são de fácil interpretação e que até pouco tempo os procedimentos eram realizados sem normalizações e de maneira mais artesanal o possível.

O guia foi elaborado com base nas normas ABNT NBR 10633 e a ABNT NBR ISO 3271 e dividido em 9 passos para a realização dos testes de forma simples, prática e objetiva, onde podemos observar suas etapas e descrições dos procedimentos.

Para a realização do Tumbler Test o guia apresenta os 9 passos abaixo:

- Realizar o peneiramento do material em peneiras com abertura de 25 mm, 16 mm e 10mm para a determinação da granulometria apropriada a realização dos teste.
- Após o peneiramento desprezar o material acima de 25 mm e abaixo de 10 mm.
- Pesar o material retido nas peneiras para a composição de amostras de 15 kg, com uma variação de no máximo 0,15 kg cada.
- Após a pesagem do material, compor 4 porções de amostras de 15 kg cada para a realização do teste.
- Pegar aleatoriamente uma das porções que será denominado de (Pi) peso inicial. Colocar o (Pi) dentro do tambor para a realização do teste.
- Fechar a porta firmemente, se possível utilizar uma massa de vidraceiro para selar a porta. O objetivo é prevenir a perda de finos durante o teste. O tambor deverá girar a 25 voltas por minuto, em um total de 200 voltas.
- Após o Tambor parar, manter a porta fechada por pelo menos 2 minutos antes de abrir, para permitir que a poeira assente. Retirar o material com cuidado.
- Peneirar o material em uma peneira de 6,30 mm e o material retido nessa peneira será denominado de (Pf) peso final.
- Calcular o índice de tamboramento como a razão percentual entre a massa da fração retida na peneira de 6,30 mm (Pf) e a massa inicial da porção de



ensaio (Pi). O percentual encontrado será aprovado se for maior ou igual a 60%. Caso contrário deverá repetir todo o procedimento.

Seguindo o mesmo pensamento e estrutura para a realização do Shatter Test o guia apresenta os 9 passos abaixo:

- Realizar o peneiramento do material em peneiras com abertura de 50 mm, 38 mm, 25 mm e 9,5 mm para a determinação da granulometria apropriada a realização dos teste.
- Após o peneiramento, desprezar o material acima de 50 mm e abaixo de 9,5 mm.
- Pesar o material retido nas peneiras para a composição de amostras de 20 kg, com uma variação de no máximo 0,2 kg cada.
- Após a pesagem do material, compor 4 porções de amostras de 20 kg cada para a realização do teste.
- Pegar aleatoriamente uma das porções de 20 kg que será denominado (Pi) peso inicial e colocar dentro da caixa de amostra para a realização do teste.
- Elevar a caixa da amostra a 2 m de altura e abrir rapidamente o fundo da caixa para que o material caia de uma só vez sobre a caixa de impacto. Repetir essa operação por mais três vezes em um total de 4 quedas consecutivas.
- Retirar todo o material cuidadosamente da caixa de impacto.
- Peneirar o material em uma peneira de 9,5mm e o material retido nessa peneira será denominado de (Pf) peso final.
- Calcular o (IQ) índice de resistência a queda como a razão percentual entre a massa da fração retida na peneira de 9,5 mm (Pf) e a massa inicial da porção de ensaio (Pi). O percentual encontrado será aprovado se for maior ou igual a 80%, sendo realizado apenas 2 vezes. Se for menor que 80% deverá ser realizado 3 vezes.

Para a realização do trabalho o objetivo principal era a produção e caracterização da resistência mecânica do síter produzido, ou seja, a produção de um coproduto constituído de resíduos sólidos siderúrgicos com o intuito de reaproveitamento dos resíduos sólidos que antes poderiam ser descartados no meio ambiente e transforma-los novamente em matéria prima.

Mas no decorrer do trabalho observou-se a necessidade da elaboração também de um guia, o qual se tornou de suma importância para a execução do objetivo principal. O guia encontra-se em anexo no final do trabalho, de forma ilustrativa e com suas respectivas etapas com mais detalhes.

## CONCLUSÕES

O presente estudo utilizou resíduos sólidos siderúrgicos, originados em processos siderúrgicos primários para a produção de sinter. A intenção foi reutilizar os resíduos que antes eram descartados no meio ambiente e transformá-los em matérias primas de adequada qualidade para utilização no alto-forno.

Os resultados obtidos revelaram que o sinter apresentou teor de ferro aproximado de 55%, com granulometria variando de 15 a 35mm e com adequada resistência mecânica para a aplicação em alto-forno. Diante disso podemos concluir que o presente estudo contribuiu para:

- Produção de um sinter constituído de resíduos sólidos siderúrgicos com teor de ferro, granulometria e resistência mecânica adequada para a aplicação em alto-forno;
- Geração de alternativas para a gestão e utilização interna de resíduos, por meio do desenvolvimento do sinter e o aperfeiçoamento do processo de reciclagem por meio da sinterização.
- A redução no consumo de recursos naturais não renováveis por meio da reutilização de resíduos sólidos em forma de matéria prima;
- Redução de custos de produção além da possibilidade de relacionar a imagem da empresa a uma produção ecologicamente correta.
- A criação de um guia simplificado dos procedimentos para a realização dos ensaios de resistência mecânica tais como Shatter e do Tumbler, visando os profissionais que lidam diretamente com os testes. Podendo ser usado para fornecer resultados como parte de um sistema de controle de qualidade na produção de sinters.

## **5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Abaixo segue as principais sugestões para trabalhos futuros:

- Realização de estudo econômico-financeiro para a aplicação do sínter constituído de grandes parcelas de resíduos.
- Avaliação do índice de porosidade do sínter produzido e avalia-lo do ponto de vista comparativo com as características mecânicas encontradas em nosso estudo.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Guilherme Corrêa. **Redução das emissões de gases efeito estufa no processo de fabricação do sinter**. 2011. 129 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/106434>

ACCIOLY, Adriana M. A. et al. **Pó de forno elétrico de siderurgia como fonte de micronutrientes e de contaminantes para plantas de milho**. *Pesq. Agropec. Bras.*, v.35, n.7, p.1483-1491, 2000.

ALMEIDA, Elisandro de. **Potencial de utilização do resíduo “carepa de aço” na fabricação de blocos de concreto**. 2009. 83f. Dissertação (Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento)- Centro Universitário Univates, Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento, Lajeado.

ALMEIDA, Marys Lene Braga; MELO, Gilberto Caldeira Bandeira de. **Alternativas de usos e aplicações dos resíduos sólidos das indústrias independentes de produção de ferro-gusa do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES - Trabalhos Técnicos, 2001. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/resisoli/brasil/iii-094.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2015

AMORIM, C.C.; LEÃO, M.D.; MOREIRA, R.M. **Comparação entre diferentes processos oxidativos avançados para degradação de corante azo**. *Eng. Sanit. Ambient.*, v.14, n.4, p.543-550, 2009.

ANDRADE, M.L.A; Cunha,L.M.S; Gandra, G.T; Ribeiro, C.C. **Mercado mundial de sucata - Relatório Setorial**. Disponível em <[www.bndes.gov.br](http://www.bndes.gov.br)> Acesso: 12 out 2004.

ARAÚJO FILHO, G. M. – **Caracterização de misturas para sinterização**. Dissertação de Mestrado aprovada pelo CPGEM/EEUFMG, Belo Horizonte, 1984.

ARAÚJO, L. A., **Manual de Siderurgia**, São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997. Volume 1.

ARCELOR MITTAL. **Relatório de sustentabilidade e responsabilidade corporativa 2012**. São Paulo, 2013. Disponível em: <http://brasil.arcelormittal.com.br/responsabilidadecorporativa/sustentabilidade/relatorio-sustentabilidade>. Acesso em: 28 mar. 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS (ABM). **Estudo prospectivo do Setor Siderúrgico: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos**. Brasília, 2008. 64p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: **Resíduos sólidos – classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6215 - **Terminologia - Produtos Siderúrgicos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

BENTES, M. G. **Segregation studies of sinter bed using a laboratory simulator. Master degree theses**. Department of Metallurgical. Eng Federal University of Brasil, Minas Gerais, 1990.

BENTES, M.A.G. – **Elevação da produtividade em sinterizações pela adequação do carregamento da mistura**. Metalurgia e Materiais, v.50, nº430, 1994, p.610-615.

BENTES, M.A.G.; SESHADRI, V. – **Studies on segregation of sinter mixes during charging in the iron ore sintering process. 3rd International Symposium on Beneficiation and Agglomeration**. Bhubaneswar, India, p. 93-110, 1991.

BERNARDES, Laudo J.L.; BERNARDES, Laura B. **Granulação na siderurgia - minério de ferro**. São José dos Campos: WAM do Brasil - WAMGROUP, Gran Tec Tecnologias. Disponível em: <http://siteimages.radarindustrial.com.br/SiteImages/Client/50718/Document/Granula%C3%A7%C3%A3o%20na%20Siderurgia%20%20Min%C3%A9rio%20de%20Ferro-921.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2015

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Lei nº 12305 de 02 de agosto de 2010.

BROSEGHINI, Felipe Costa; GRILLO, Felipe Fardin; OLIVEIRA, José Roberto de. **Utilização de briquetes de resíduos siderúrgicos na fabricação de ferro-gusa**. Vitória: Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo; 5ª Jornada de Iniciação Científica; 3ª Jornada de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, 2010.

BUTLER, J.; HOOPER, P.. **Dilemmas in optimising the environmental benefit from recycling: A case study of glass container waste management in the UK. Resources, Conservation and recycling**. V. 45, n. 4, p. 331-55, 2005.

BUZIN, Pedro Jorge Walburga Keglevich de. **Desenvolvimento de briquetes autoredutores a partir de carepas de processamento siderúrgico para utilização em forno elétrico a arco**. Porto Alegre: Dissertação de mestrado em Engenharia ao Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, 2009.

CANTARINO, Marcos Vinícius. **Estudo da remoção de zinco e de alcalis contidos em lamelas de aciaria LD**. Belo Horizonte: Dissertação de mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas a UFMG, 2011. Disponível em:

<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUOS-8MSJ2U>. Acesso em: 02 mar. 2015

CAPORALI, L. et alii. **Relação microestrutura – propriedades – desempenho de minérios de ferro na sinterização**. In: Seminário de redução de minérios de ferro, 29, 1998. Belo Horizonte. ABM, p 701 –717, 1998,

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

CARNEIRO, M.A; J. A. N, VIDAL; NAJAR, F. J., – **Avaliação de matérias-primas e sua influência na produtividade da sinterização**. Metalurgia ABM, 40 (321), Ago, p 429-433, 1984,

CARVALHO-PUPATTO, Juliana Garcia; et al. **Efeito de escória de alto forno no crescimento radicular e na produtividade de arroz**. Pesq. Agropec. Bras. v.38, n.11, p.1323-1328, 2003.

CHAVES, Alin Júnior Machado. **Noções de Metalurgia**. Minas Gerais: UFMG, 2014. Disponível em: <http://www.trabalhosfeitos.com/ensaios/Apostila-No%C3%A7%C3%B5es-De-Metalurgia-Ufmg/61199605.html>. Acesso em: 17 out.2015

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI. Instituto Aço Brasil. **A indústria do aço no Brasil**. Brasília: CNI, 2012. 48 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA / INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Mineração e economia verde**. Brasília: CNI, 2012. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002708.pdf>>. Acessado em: 15 mar. 2016

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Visão da indústria brasileira sobre a gestão de resíduos sólidos**. Brasília: CNI - Gerência Executiva de Meio Ambiente e Sustentabilidade - GEMAS / FIRJAN, 2014. Disponível em: [http://arquivos.portaldaindustria.com.br/portlet/200/27357/Visao\\_da\\_Industria\\_Residuos\\_Solidos.pdf](http://arquivos.portaldaindustria.com.br/portlet/200/27357/Visao_da_Industria_Residuos_Solidos.pdf). Acesso em: 28 mar. 2015

CSN. Visualização da página da web. São Paulo, 2015. Disponível em: [http://www.csn.com.br/irj/portal/anonymous?guest\\_user=usr\\_csn\\_pt](http://www.csn.com.br/irj/portal/anonymous?guest_user=usr_csn_pt). Acesso em: 27 set. 2015.

CUNHA, Adriano Ferreira; FILHO, Gerson de Araújo; JÚNIOR, Álvaro Martins; GOMES, Olídio Carlos Blanc; ASSIS, Paulo Santos. **Aspéctos técnicos da utilização da carepa gerada em processos siderúrgicos e tratada por**

**desagregação ultra-sônica.** São Paulo: 36º Seminário internacional de fusão, refino e solidificação dos metais, 2006.

CUNHA, Adriano Ferreira; MOL, Marcos Paulo Gomes; MARTINS, Máximo Eleotério; ASSIS, Paulo Santos. **Caracterização, beneficiamento e reciclagem de carepas geradas em processos siderúrgicos.** Minas Gerais: Revista escola de minas, v. 15, p. 111 - 116, 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672006000100014>. Acesso em: 28 mar. 2015

DE, A; GUPTA, S.S.; CHATTERJEE, A; MUKHERJEE, T. – **Possibility of Dunitite Usage in Sintermaking: Studies at Tata Steel.** Ironmaking and Steelmaking, 1995, Vol 22, Nº1

DIAS, Flávia Oliveira; CAUX, Aline Cristina Pereira Sousa; SANTOS, Robson; SOBRINHO, Pedro José Nolasco. **Reciclagem de lama de aciaria através de aglomeração para utilização em altos-fornos.** Vila Velha: 41º Seminário de redução de minério de ferro e matérias-primas - 12º Simpósio brasileiro de minério de ferro, Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração - ABM, 2011.

ERON'KO, S. P.; OSHOVSKAYA, E. V.; BABAK K. Yu. **The shaping process of qualitative briquettes from millscale.** United States: Academic Journal, Metallurgical Processes & Equipment, v. 33, p. 61, 2013.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Processos de aglomeração de minérios.** São Paulo: USP, 2013. Disponível em: [disciplinas.stoa.usp.br/mod/resource/view.php?id=42407&redirect=1](http://disciplinas.stoa.usp.br/mod/resource/view.php?id=42407&redirect=1) Acesso em: 05 nov. 2013

FIA, Fátima. R. L.; et al. **Remoção de compostos fenólicos em reatores anaeróbios de leito fixo com diferentes materiais suporte.** Eng. Agríc. Ambiental, v.14, n.10, p.1079-1086, 2010.

FILHO, Arnaldo Costa Barra. CST - **Sinterização.** Serra, 2015. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=vSZTPnHjiR8>. Acesso em: 27 set. 2015

FREITAS, Hérika Braga de; MOTTA, Laura Maria Gorettida. **Uso de escória de aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado.** Transportes, v.16, n.2, p.5-12, 2008.

FURUI, T. – **Technology for preparation of raw materials to be sintered.** Nippon Steel Technical Report Overseas, nº 10, November, p. 36, 1977.

GEGENHEIMER, Rogerio. CST - **Alto Forno.** Serra, 2015. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=UtMy4ZY3jgc> ; Acesso em: 27 set. 2015



GERDAU. **Assuntos Institucionais e Comunicação Corporativa**. São Paulo, 2015. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=vrgQaq3Y0IU>. Acesso em: 27 set. 2015

GRILLO, Felipe F.; TENÓRIO, Jorge A. Soares; OLIVEIRA, José R. de. **Caracterização e adição de poeira de aciaria elétrica em ferro-gusa**. Esc. Minas, Ouro Preto, v.66, n.3, p.301-307, 2013.

HIRSCH, Ulrich. **Briquetting of metallurgical residues to be returned to the material cycle**. Hattingen: Maschinenfabrik KOPPERN, v. 12, p. 1 - 9, 2013. Disponível em: [http://www.koepperninternational.com/uploads/media/Briquetting\\_of\\_Metallurgical\\_Residues.pdf](http://www.koepperninternational.com/uploads/media/Briquetting_of_Metallurgical_Residues.pdf). Acesso em: 25 set. 2014

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**. Dissertação (Mestrado) apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), MG, 2005.

HONORATO, E.P; RANGEL, NAJAR, F. J. - Curso: **Utilização do minério de ferro na siderurgia**. USIMINAS, Ipatinga, M.G, Ipatinga, M.G, Brasil, p.6-27, 1993

INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB). **Aço & sustentabilidade**. (folder). Rio de Janeiro, 2015.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB). **Relatório de sustentabilidade 2014**. Rio de Janeiro, 2014.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Aço e economia**. Rio de Janeiro: Folder Aço / Construindo um futuro sustentável, 2016. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/publicacoes.asp>. Acesso em: 19 jan. 2016

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Aço e economia**. Rio de Janeiro: Folder Aço / Construindo um futuro sustentável, 2015. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/publicacoes.asp>. Acesso em: 29 set. 2015

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA (IBS). **Siderurgia Brasileira: princípios e políticas**. 2007. Disponível em: <http://www.ibs.com.br>.

ISHIKAWA, Y.; KASE M.; SAZAKI, M. – **Recent progress in the sintering technology – high reducibility and improvement of fuel consumption**. Ironmaking conference proceedings, AIME, v 42, p 80 – 89, 1982.

JACOMINO, Vanusa Maria Feliciano; et al. **Controle ambiental das indústrias de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal**. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002. 302p.

JACOMINO, Vanusa Maria Feliciano; et al. **Controle ambiental das indústrias de**

JOHN, Vanderley M.; ÂNGULO, Sérgio Cirelli. **Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos - Utilização de Resíduos na Construção Habitacional**. Porto Alegre: ANTAC, 2003.

JUNIOR, Luiz Alberto B. Pinto; et al. **Caracterização da mistura de resíduos de granito e escória de aciaria LD**. Esc. Minas, Ouro Preto, v.64, n.2, p.169-174, 2011.

LEMOS, Leandro Rocha. **Produção de briquetes de resíduos siderúrgicos para utilização em altos-fornos.**/ Leandro Rocha Lemos – Belo Horizonte: UFMG: 2015.

LOPES, Marcelino Vieira. **Caracterização de sínter de minério de ferro para uso em alto-fornos a carvão vegetal**. Itajubá: Dissertação de mestrado em Engenharia de Materiais a Universidade Federal de Itajubá, 2012. Disponível em: <http://saturno.unifei.edu.br/bim/0039913.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2015

LORA, Electo Eduardo Silva. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transportes**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2002.

MACHADO, Marcelo Lucas Pereira. **Apostila de siderurgia - da matéria prima ao aço laminado**. Vitória: Curso de Engenharia do Centro Federal de Educação Tecnológica do Estado do Espírito Santo - CEFETES, 2006. Disponível em: [ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec\\_NOTURNO/.../Siderurgia.pdf](ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO/.../Siderurgia.pdf). Acesso em: 28 mar. 2015

MAGALHÃES, J. A.;HONORATO, E.P; BASTOS, J. R. - **Implantação do Sistema de Carregamento I.S.F nas sinterizações da USIMINAS**. II Simpósio de Minério de Ferro da ABM, , Ouro Preto, M.G, Brasil, p. 264-279, 1999

MOSZKOWICZ, Jacques; CARVALHO, Pedro Sergio Lamdim de; SILVA, Marcelo Machado da; ROCIO, Marco Aurélio Ramalho. Insumos Básicos. **Departamento de Insumos Básicos da Área de Insumos Básicos do BNDES**. Setorial 39. p. 197-234, 2004. Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/)

MOURÃO, Marcelo Breda (coord.). **Introdução à siderurgia**. São Paulo, ABM, 2011.

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

NATAL, L.F.G; PEREZ, F.A; SILVA, M.H.R.T; SILVA, A.L; SERRA, A.R.; –**Utilização de Olivina como fundente na Sinterização da COSIPA**. XXVI Seminário de Redução de Matérias-primas Siderúrgicas. ABM, novembro, p. 185-197, 1995.

NIPPON STEEL CORPORATION. **Development of a new type of feeding method for homogenization of sintering reaction**. Ironmaking Conference Proceedings, 1990, p 589 – 601

NOGUEIRA, P.R.S.M. **Relação entre características das frações grossas do minério, produtividade e qualidade do sínter**. Belo Horizonte. CPGEM/EEUFMG, 1987. (Dissertação de mestrado).

OLIVEIRA, D.; PINHEIRO, P.; NAPOLEÃO, A. – **Metodologia para avaliar minérios para sinterização com leitões intensamente segregados**. XXXIII Seminário de Redução de Minério de Ferro, ABM, Ouro Preto, M.G, Brasil, p.139-149, 2003.

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.

PERET, A. T.; MIRANDA, F; FRANCO, J.O.A; RIBEIRO, L.G; CANTARINO, M.V. **Gestão de Resíduos Sólidos e co-produtos um estudo de caso: Arcelor Aços Longos**. In: 63º congresso Anual da ABM. **Anais**. Santos: ABM, 2008, p. 1733- 1743.

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

PIMENTA, H. P; CAMILO, G; MAGALHÃES, J. R.– **Otimização das Propriedades do Sínter a Altas Temperaturas. Relatório Interno do Centro de Pesquisa da USIMINAS** (RPPR1348), dezembro 2002, Ipatinga, M.G

PIMENTA, H. P; PACHECO, T. A; MAGALHÃES, J. R.– **Caracterização Microestrutural do Sínter na USIMINAS**. Seminário Fonte Alternativas de Energia para Redução do Minério de Ferro. COMIN/COMAP/COCARV/COCARBO, ABM, , Belo- Horizonte, M.G, p. 95-114, 1991

PIMENTA, H.P; SESHADRI, V. – **Characterization of structure of iron and its behavius during reduction at low temperatures**. Ironmaking and Steel Making, , vol 29, N°3, p. 169-174, 2002

PIMENTA, H.P; SESHADRI, V. – **Influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> on reduction and degradation behaviour at low temperatures**. Ironmaking and Steel making, vol 29, Nº3, p.175-179, 2002.

RECKZIEGEL, Viviana Nedel. **Caracterização para o aproveitamento do resíduo sólido de um triturador de sucata em uma usina siderúrgica**. Porto Alegre: Dissertação de mestrado em Engenharia a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/61136/000862964.pdf?sequence=1>. Acesso em: 01 jun. 2015

REIS, Walter Luiz da Costa. **Otimização da reciclagem de resíduos siderúrgicos por redução carbotérmica**. São Carlos: Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais a Universidade Federal de São Carlos, 2008. Disponível em: [http://www.bdt.d.ufscar.br/htdocs/tedeSimplificado//tde\\_busca/arquivo.php?codArquivo=2811](http://www.bdt.d.ufscar.br/htdocs/tedeSimplificado//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=2811). Acesso em: 17 jun. 2015

ROCHA, S. H. F. S. **Agglomeration of Steelmaking Residues and the Implication of its Use in Blast Furnace and Direct Reduction Processes**. In: METEC InSteelCon International Steel Conference on New Developments in Metallurgical Process Technologies. Düsseldorf, Germany, 2007. P.1011-1018.

ROLLER, P.W.– **Granulation of iron ore sinter feeds**. BHP Technical Bulletin, v 25, nº 1, May, p.79, 1981.

ROSIÈRE, C. A . **Classificação genética de minérios de ferro – Problemas e vícios – Proposta de uma classificação tipológica para a indústria**. Seminário de redução de minério de ferro, Vitória, p 295 – 302, 1997,.

ROSIÈRE, C. A.; QUADE H.; SIEMES, H.; et alii. **Um modelo para para evolução microestrutural de minérios de ferro do quadrilátero ferrífero**. Parte II – Trama, textura e anisotropia de susceptibilidade magnética – Geonomus, v 4, nº 1, p 61 – 75, 1996.

Santos, Flávio Andreote dos. **Gestão de resíduos sólidos industriais : análise de resíduo siderúrgico** / Flávio Andreote dos Santos. – Lavras : UFLA, 2015. 90 p. : il.

SANTOS, Patrícia Maria. **Avaliação de alternativas para a prevenção, reciclagem e co-processamento de resíduos em uma empresa do setor siderúrgico**. São Paulo: Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 2006. Disponível em: [http://cassiopea.ipt.br/tde\\_arquivos/teses/%7B30C0F087-7B08-4D21-A4AEF1AB6CE41AE0%7D\\_2006\\_TA\\_Patricia\\_Maria\\_Santos.pdf](http://cassiopea.ipt.br/tde_arquivos/teses/%7B30C0F087-7B08-4D21-A4AEF1AB6CE41AE0%7D_2006_TA_Patricia_Maria_Santos.pdf). Acesso em: 28 mar. 2015

SANTOS, Patrícia Maria. **Avaliação de alternativas para a prevenção, reciclagem e co-processamento de resíduos em uma empresa do setor siderúrgico.** São Paulo: Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 2006. Disponível em: [http://cassiopea.ipt.br/tde\\_arquivos/teses/%7B30C0F087-7B08-4D21-A4AEF1AB6CE41AE0%7D\\_2006\\_TA\\_Patricia\\_Maria\\_Santos.pdf](http://cassiopea.ipt.br/tde_arquivos/teses/%7B30C0F087-7B08-4D21-A4AEF1AB6CE41AE0%7D_2006_TA_Patricia_Maria_Santos.pdf). Acesso em: 28 mar. 2015

SCHINAZI, Gustavo; PACIORNIK, Sidnei. **Caracterização de sínter de minério de ferro por microscopia óptica digital.** Rio de Janeiro: Departamento de Ciência de Materiais e Metalurgia - PUC-RIO, 2008. Disponível em: [www.puc-rio.br/pibic/relatorio\\_resumo2008/.../ctc/.../dcm%205.pdf](http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2008/.../ctc/.../dcm%205.pdf). Acesso em: 17 out. 2015

SCHINAZI, Gustavo; PACIORNIK, Sidnei. **Caracterização de sínter de minério de ferro por microscopia óptica digital.** Rio de Janeiro: Departamento de Ciência de Materiais e Metalurgia - PUC-RIO, 2008. Disponível em: [www.puc-rio.br/pibic/relatorio\\_resumo2008/.../ctc/.../dcm%205.pdf](http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2008/.../ctc/.../dcm%205.pdf). Acesso em: 17 out. 2015

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Sinterização de Minério de Ferro.** Rio de Janeiro: SENAI, 2015. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=zJxtKlbU0Gc>. Acesso em: 27 set. 2015

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Sinterização de Minério de Ferro.** Rio de Janeiro: SENAI, 2015. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=zJxtKlbU0Gc>. Acesso em: 27 set. 2015

SILVA, José Nazareno Santos. **Siderurgia.** Belém do Pará: e-TEC Brasil - Escola Técnica Aberta do Brasil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2011. Disponível em: [http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifpa/tecnico\\_metalurgica/siderurgia.pdf](http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifpa/tecnico_metalurgica/siderurgia.pdf). Acesso em: 17 jun. 2015

SILVA, José Nazareno Santos. **Siderurgia.** Belém do Pará: e-TEC Brasil - Escola Técnica Aberta do Brasil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2011. Disponível em: [http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifpa/tecnico\\_metalurgica/siderurgia.pdf](http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifpa/tecnico_metalurgica/siderurgia.pdf). Acesso em: 17 jun. 2015

SILVA, M.S.S; CAMILO,G; SCUDELLER, L. M; HONORATO, E,P. – **Avaliação da influência da granulometria do serpentinito na qualidade da mistura e do sínter da MS3. Relatório interno do Centro de Pesquisas da Usiminas (RAMR5348),** dezembro de 2005, Ipatinga, M.G.

SILVA, M.S.S; CAMILO,G; SCUDELLER, L. M; HONORATO, E,P. – **Avaliação da influência da granulometria do serpentinito na qualidade da mistura e do sínter**

da **MS3. Relatório interno do Centro de Pesquisas da Usiminas** (RAMR5348), dezembro de 2005, Ipatinga, M.G.

SINDIFER. Anuário 2014. Minas Gerais: **Sindicato da indústria do Ferro**, 2015. Disponível em: [http://www.sindifer.com.br/institucional/industria\\_ferro\\_gusa/producao\\_ferro\\_gusa\\_a\\_co.php](http://www.sindifer.com.br/institucional/industria_ferro_gusa/producao_ferro_gusa_a_co.php); Acesso em: 27 set. 2015

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

TAKANO, C.; CAPOCCHI J. D. T.; NASCIMENTO, R. C.; MOURAO, M. B.; SANTOS, D. M.; LENZ G., 2000. **A reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos, Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais**, São Paulo, Disponível em: [http://www.ambiente.sp.gov.br/residuos/ressolid\\_ind/palest.htm](http://www.ambiente.sp.gov.br/residuos/ressolid_ind/palest.htm),

TAKEHARA, Lucy. **Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – fração sinter feed**. Porto Alegre: Tese de Doutorado em Geociência a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/publique/media/dou\\_lucytakehara.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/dou_lucytakehara.pdf)>. Acessado em: 15 mar. 2016

TCS SINTERIZAÇÃO. **Dossiê TCS sinterização**. Volta Redonda, 2014

TELLES, Victor Bridi; ESPINOSA, Denise Crocce Romano; TENÓRIO, Jorge Alberto Soares. **Produção de sinter de minério de ferro utilizando poeira de aciaria elétrica como matéria prima**. São Paulo: Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 10, p. 72 – 77, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.2013.010> Acesso em: 17 out. 2015

VARGAS, Uriel; CABRAL, Eduardo. **Co-produtos (resíduos) da indústria siderúrgica e mineração: condicionamento para reciclagem**. Vila Velha: 40º Seminário de redução de minério de ferro e matérias primas, ABM - Associação Brasileira de metalurgia, materiais e mineração, 2010. Disponível em: <http://eduardocabral.xpg.uol.com.br/Artigos/ABM.pdf>. Acesso em: 17 jun 2015

VIEIRA, C.B; ROSIÈRE, C. A; PENA, E. Q; SESHADRI V.; ASSIS, P.S. - **Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras: Uma análise crítica**. REM, Esc. de Minas de Ouro Preto, 56(2), 97-102, 2003.

VOTORANTIM SIDERURGIA. **Animação do processo siderúrgico adotado pelas unidades da VS**. São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.vsiderurgia.com.br/pt-br/aco/acosLongos/visitaVirtual/Paginas/visitaVirtual.aspx>. Acesso em: 27 set. 2015

YADAV, U.S.; RANJAN, A; DAS, B.K; GHOSH, S. – **Evolution of sinter quality at Tata Steel**. The 5th European Coke and Ironmaking Congress, Stockholm – Swiden  
– Second Volumew, Tu 9: 1-16, june 2005

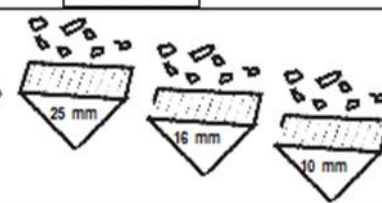



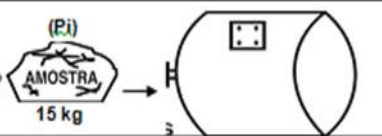
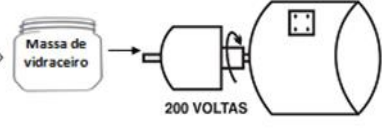
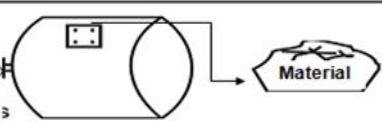
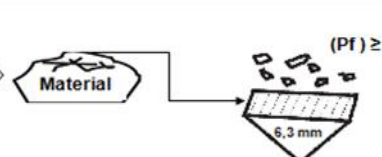

## ANEXO

**Anexo 1:** Guia simplificado dos procedimentos para a realização do Tumbler Test.

Elaborado pelo autor com base na norma ABNT NBR ISO 3271.

### GUIA SIMPLIFICADO DOS PROCEDIMENTOS PARA REALIZAÇÃO DO

#### “TUMBLER TEST”

	ETAPAS	DESCRIÇÃO
1.		<ul style="list-style-type: none"> <li>Realizar o peneiramento do material em peneiras com abertura de 25 mm, 16 mm e 10 mm para a determinação da granulometria apropriada a realização dos teste.</li> </ul>
2.		<ul style="list-style-type: none"> <li>Após o peneiramento desprezar o material acima de 25 mm e abaixo de 10 mm.</li> </ul>
3.		<ul style="list-style-type: none"> <li>Pesar o material retido nas peneiras para a composição de amostras de 15 kg, com uma variação de no máximo 0,15 kg cada.</li> </ul>
4.		<ul style="list-style-type: none"> <li>Após a pesagem do material, compor 4 porções de amostras de 15 kg cada para a realização do teste.</li> </ul>
5.		<ul style="list-style-type: none"> <li>Pegar aleatoriamente uma das porções que será denominado de (Pi) peso inicial. Colocar o (Pi) dentro do tambor para a realização do teste.</li> </ul>
6.		<ul style="list-style-type: none"> <li>Fechar a porta firmemente, se possível utilizar uma massa de vidraceiro para selar a porta. O objetivo é prevenir a perda de finos durante o teste. O tambor deverá girar a 25 voltas por minuto, em um total de 200 voltas.</li> </ul>
7.		<ul style="list-style-type: none"> <li>Após o Tambor parar, manter a porta fechada por pelo menos 2 minutos antes de abrir, para permitir que a poeira assente. Retirar o material com cuidado.</li> </ul>
8.		<ul style="list-style-type: none"> <li>Peneirar o material em uma peneira de 6,30 mm e o material retido nessa peneira será denominado de (Pf) peso final.</li> </ul>
9.		<ul style="list-style-type: none"> <li>Calcular o índice de tamboramento como a razão percentual entre a massa da fração retida na peneira de 6,30 mm (Pf) e a massa inicial da porção de ensaio (Pi). O percentual encontrado será aprovado se for maior ou igual a 60%. Caso contrário deverá ser repetido o procedimento.</li> </ul>



**Anexo 2:** Guia simplificado dos procedimentos para a realização do Shatter Test. Elaborado pelo autor com base na norma ABNT NBR 10633.

**GUIA SIMPLIFICADO DOS PROCEDIMENTOS PARA REALIZAÇÃO DO**

ETAPAS	"SHATTER TEST"	DESCRIÇÃO
1. Peneirar o material;		<ul style="list-style-type: none"> <li>Realizar o peneiramento do material em peneiras com abertura de 50 mm, 38 mm, 25 mm e 9,5 mm para a determinação da granulometria apropriada a realização dos teste.</li> </ul>
2. Desprezar o material;		<ul style="list-style-type: none"> <li>Após o peneiramento, desprezar o material acima de 50 mm e abaixo de 9,5 mm.</li> </ul>
3. Pesar o material;		<ul style="list-style-type: none"> <li>Pesar o material retido nas peneiras para a composição de amostras de 20 kg, com uma variação de no máximo 0,2 kg cada.</li> </ul>
4. Compor 4 amostras;		<ul style="list-style-type: none"> <li>Após a pesagem do material, compor 4 porções de amostras de 20 kg cada para a realização do teste.</li> </ul>
5. Colocar na caixa;		<ul style="list-style-type: none"> <li>Pegar aleatoriamente uma das porções de 20 kg que será denominado (Pi) peso inicial e colocar dentro da caixa de amostra para a realização do teste.</li> </ul>
6. Elevar a 2m de altura e deixar cair o material		<ul style="list-style-type: none"> <li>Elevar a caixa da amostra a 2 m de altura e abrir rapidamente o fundo da caixa para que o material caia de uma só vez sobre a caixa de impacto. Repetir essa operação por mais três vezes em um total de 4 quedas consecutivas.</li> </ul>
7. Retirar o material		<ul style="list-style-type: none"> <li>Retirar todo o material cuidadosamente da caixa de impacto.</li> </ul>
8. Peneirar o material		<ul style="list-style-type: none"> <li>Peneirar o material em uma peneira de 9,5mm e o material retido nessa peneira será denominado de (Pf) peso final.</li> </ul>
9. Calcular (IQ) Aprovação	$IQ = \frac{Pf}{Pi} \times 100 \rightarrow \text{Aprovado} \Leftrightarrow IQ \geq 80\%$ <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> <p>2 vezes <math>\Leftrightarrow</math> IQ <math>\geq</math> 80%              3 vezes <math>\Leftrightarrow</math> IQ &lt; 80%</p> </div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Calcular o (IQ) índice de resistência a queda como a razão percentual entre a massa da fração retida na peneira de 9,5 mm (Pf) e a massa inicial da porção de ensaio (Pi). O percentual encontrado será aprovado se for maior ou igual a 80%, sendo realizado apenas 2 vezes. Se for menor que 80% deverá ser realizado 3 vezes.</li> </ul>