

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

CLAUDINE GUIMARÃES LEITE CARDOSO

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE SÍNER A
PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS SIDERÚRGICOS PARA
APLICAÇÃO EM ACIARIA**

VOLTA REDONDA

2016

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

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE SÍNTER A
PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS SIDERÚRGICOS PARA
APLICAÇÃO EM ACIARIA**

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 processamentos e caracterização de materiais e linha de pesquisa materiais metálicos.

Aluna:
Claudine Guimarães Leite Cardoso

Orientador:
Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

**VOLTA REDONDA
2016**

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

C268d 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.

86 p. : II

Orientador(a): Alexandre Fernandes Habibe

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

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

CDD – 620.1

FOLHA DE APROVAÇÃO

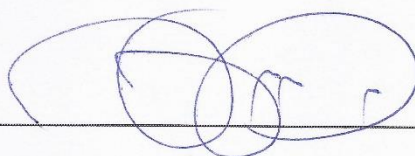
Aluna: Claudine Guimarães Leite Cardoso

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE SÍNTER A PARTIR DE
RESÍDUOS SÓLIDOS SIDERÚRGICOS PARA APLICAÇÃO EM ACIARIA**

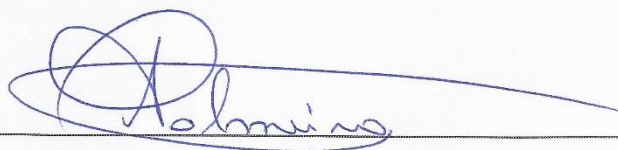
Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Banca Examinadora



Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe



Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira



Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que me presenteou com o bem mais precioso que poderia receber um dia, a vida, e com ela a capacidade para pensar, amar e lutar por esta conquista.

A minha família pelo apoio e dedicação, em especial ao meu esposo Rafael, a minha mãe Claudia e a Christina que sustentaram os momentos ausentes.

Aos amigos de coração que ficavam escutando os comentários no decorrer do estudo, agradeço a paciência.

Ao meu Orientador Professor Dr. Alexandre Fernandes Habibe, pelos ensinamentos e dedicação dispensados no auxílio à concretização desse trabalho.

Ao apoio técnico de Maurício Theodoro e Robson Ribeiro na coleta de informações e acompanhamento dos testes na planta de sinterização.

E aos colegas, técnicos e Professores do MEMAT empenhados em ajudar.

CARDOSO, C. G. L. **Desenvolvimento e caracterização de sinter a partir de resíduos sólidos siderúrgicos para aplicação em aciaria**. 2016. 86 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda - UniFOA, Volta Redonda-RJ.

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido um sinter com objetivo do aproveitamento de resíduos sólidos siderúrgicos motivado à aplicação como matéria prima a produção de aço para aplicação direta a etapa de refino em aciarias. O interesse científico e comercial na utilização de resíduos é crescente principalmente no âmbito de sustentabilidade nas organizações. Além da visão ecoeficiente, como vantagem a essa aplicação, visa-se o maior conhecimento da composição química da matéria prima a ser aplicada em aciarias elétricas considerando a substituição de parte da sucata, muitas vezes encontrada contaminada nas peças de obsolescência. No contexto do presente trabalho, também foi considerado a possibilidade do sinter desenvolvido agir de maneira refrigerante proporcionando o controle da temperatura no banho de aço. Os resíduos sólidos utilizados para a obtenção da mistura em massa foram classificados dentre os ricos em ferro como lama de aciaria, pó misto e de “*bag house*”, carepa e retorno do próprio sinter, dentre outros como moinha de coque e pó de cal. Os coprodutos foram aplicados a planta real de sinterização projetada pela empresa TCS Sinterização e posteriormente o sinter foi caracterizado por técnica de Raio X (DRX) para determinação da análise química e monitorado o indicador metalúrgico rendimento. Os resultados obtidos revelaram que o sinter apresentou teor de ferro total de 54 a 58% com granulometria variando de 15 a 35mm e rendimento de 53,8% confirmando o interesse comercial de sua aplicação na substituição de parte da carga metálica como matéria prima. Dentre os cuidados necessários nesta aplicação, tornou-se notório o grau de contaminação dos resíduos sólidos e a necessidade do seu correto armazenamento e separação, condição crucial para futuras aplicações.

Palavras-chave: resíduos sólidos, sinter, sinterização, materiais

CARDOSO, C. G. L. **Development and characterization of sinter from steel solid residue for use in steelworks.** 2016. 86 f. Dissertation (Professional Master in Materials) – Foundation Oswaldo Aranha, University Center of Volta Redonda - UniFOA, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brazil.

ABSTRACT

In this work we developed the sinter with purpose the use of steel solid residue motivated the application as raw material for steel production for direct application to the refining stage in steel mills. The scientific and commercial interest in the use of residue is growing especially within sustainability in organizations. In addition to eco-efficient vision, the advantage of this application, the aim is the greatest knowledge of the chemical composition of the raw material to be applied in electric steelworks considering replacing part of the junk often found in contaminated obsolete parts or even radioactive. In the context of this study, the possibility was also considered sinter developed act refrigerant so providing temperature control in the steel bath. The solid residue used to obtain the mass mixture were classified into iron-rich and steelmaking sludge, mixed powder and "bag house", scale and return sinter itself, among other chaff as coke and lime powder. The co-products were applied to real sinter plant designed by TCS Sinterização now and then the sinter was characterized by X-ray technique (XRD) to determine the chemical analysis and monitoring the metallurgical performance indicator. The results showed that the sinter had total of 54 - 58% iron content with a particle size ranging from 15 to 35mm and yield of 53.8% confirming the commercial interest of its application in replacement of the metal load as raw material. Among the care required in this application, it became apparent the degree of contamination of solid residue and the need for their correct storage and separation, crucial condition for future applications.

Keywords: solid residue; sinter, sintering, materials

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivo	14
1.2	Justificativa.....	14
2.	REVISÃO BIBILOGRÁFICA	15
2.1	A Mineração	15
2.2	A Siderurgia.....	18
2.2.1	Principais Insumos na Siderurgia	23
2.2.2	Extração do ferro de seu minério através de processos de redução	24
2.2.3	Refino para conversão do ferro gusa em aço	25
2.2.4	Atual Geração de Resíduos Sólidos Siderúrgicos.....	28
2.2.5	Tipos de Resíduos Sólidos Siderúrgicos.....	31
2.3	Apelo Ecológico.....	34
2.4	Processamento de Resíduos Sólidos na Siderurgia	35
2.4.1	Briquetagem.....	38
2.4.2	Pelotização.....	39
2.4.3	Sinterização	41
2.4.3.1	Qualidade do Sínter.....	55
2.4.4	Aplicação de Coprodutos Reaproveitáveis.....	57
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
3.1	Materiais.....	59
3.2	Métodos.....	61
3.2.1	Equipamento de Sinterização	63
3.2.2	Sistema de Dosagem.....	66
3.2.3	Sistema de Mistura e Aglomeração.....	67

3.2.4	Área de Sinterização	67
3.2.5	Determinação do Rendimento do Processo	67
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	69
5.	CONCLUSÕES.....	78
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	79
7.	REFERÊNCIAS	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Participação dos setores consumidores de aço no Brasil.....	19
Figura 2 - Aplicação usual de aço no dia-a-dia.....	20
Figura 3 - Processos de usina integrada.....	21
Figura 4 - Processos de usina semi integrada.....	21
Figura 5 - Parque mineiro de produtores independentes de ferro gusa.....	22
Figura 6 – Localização das empresas produtoras de aço no país.....	28
Figura 7 – Fluxo de produção do aço e geração de resíduos sólidos.....	29
Figura 8 – Desempenho ambiental em 2014.....	30
Figura 9 – Diversas camadas de óxido da carepa.....	33
Figura10 – Gestão de resíduos siderúrgicos.....	37
Figura 11 – Princípio da compressão em prensa de rolos.....	38
Figura 12 – Disco de Pelotamento.....	40
Figura 13 – Esquema simplificado do processo de sinterização.....	42
Figura 14 – Fluxograma esquemático do processo de sinterização.....	44
Figura 15 – Esquema do sistema de sinterização contínua tipo Dwight–Lloyd.....	45
Figura 16 – Esquema do princípio da sinterização.....	48
Figura 17 - Esquema de movimento da frente de combustão.....	50
Figura 18 – Esquema de máquina de sinterização intermitente demonstrando avanço e temperatura da frente de combustão.....	51
Figura 19 – Corte longitudinal do leito da máquina de sinterização contínua.....	52
Figura 20 – Corte transversal do leito de uma máquina de sinterização contínua.....	52
Figura 21 – Fluxograma de uma sinterização.....	54
Figura 22 - Fluxograma da metodologia aplicada neste trabalho.....	62
Figura 23 – Sinterização Contínua da Tecnosulfur destinada a sinterização para Aciaria.....	64
Figura 24 – Representação do processo de sinterização.....	65
Figura 25 – Representação gráfica de geração mensal de resíduos sólidos da usina integrada e média ponderada do teor de ferro.....	69
Figura 26 – Acompanhamento da temperatura da mistura / sínter durante a sinterização.....	71
Figura 27 – Representação gráfica do teor de Fe total nas amostras de sínter.....	73

Figura 28 – Avaliação da correlação entre basicidade e teor de Fe_T	74
Figura 29 – Intervalo dos compostos e elementos associados a composição química do sínter para aplicação em aciaria. (a) Box Plot para Al_2O_3 ; (b) Box Plot para MgO ; (c) Box Plot para Mn ; (d) Box Plot para P	75
Figura 30 – Rendimento da sinterização em função da basicidade.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais minerais de ferro e suas classes.....	18
Tabela 2 – Composição química de tijolos refratários.....	27
Tabela 3 – Propriedades físicas e químicas do sinter.....	55
Tabela 4 – Representação do volume gerado de resíduos sólidos na cadeia produtiva de usina integrada.....	59
Tabela 5 – Composição química da matéria prima utilizada na sinterização.....	60
Tabela 6 – Proporções da matéria prima utilizando resíduos sólidos nos silos.....	67
Tabela 7 - Composição química do sinter focada na quantidade de Fe_T	72
Tabela 8 - Composição química do sinter considerando os demais constituintes.....	72

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
°C	Graus Celsius
CCABrasil	Centro de Coprodutos Aço Brasil
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
DRX	Difração de raios X
FEA	Forno Elétrico a Arco
Fe _T	Ferro total
FIRJAN	Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro
g.cm ⁻³	Grama por centímetro cúbico
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IBS	Instituto Brasileiro de Siderurgia
ISO	" <i>International Organization for Standardization</i> " (Organização Internacional para Padronização)
kg	Quilograma
kg/t	Quilograma por tonelada
m	Metro
m ²	Metro quadrado
mesh	Rede de malha por polegada quadrada
min	Minuto
mm	Milímetro
N	Número de amostras
NBR	Norma Brasileira
R-Sq	Chi quadrado
R-Sq adj	Chi quadrado ajustado
SGA	Sisitema de Gestão Ambiental
SINDIFER	Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais
StDev	Desvio padrão
t	Tonelada
t/h	Tonelada por hora
η	Rendimento

1. INTRODUÇÃO

A estratégia industrial atual objetiva a competitividade aliada a sustentabilidade visando o incremento da produtividade com a redução do consumo dos recursos naturais e eliminação de desperdícios.

A alternativa estratégica é baseada em princípios de inovação de processos e produtos em modelos gerados a partir de menores impactos ambientais promovendo a eficiência no uso de recursos e a gestão adequada de resíduos sólidos. Portanto, a consideração de resíduo sólido como material indesejado e de alto custo para disposição deixa de existir, dando lugar ao conceito de coproduto, agregando valor econômico e ambiental a produtos de qualidade (rejeito zero).

As empresas sofrem pressões na redução da geração dos resíduos, assim como no reaproveitamento para mitigação do impacto ambiental reduzindo as disposições em aterros. Assim, atualmente pesquisas com foco em agregar valor aos resíduos sólidos tem sido aplicado às tecnologias e conceitos produtivos ganhando espaço em discussões sobre reaproveitamento atendendo as normatizações e legislações que vêm sempre se atualizando, como a revisão da norma internacional ISO 14001:2015 que considera robusto o sistema de gestão ambiental (SGA) das organizações prevenindo e controlando os impactos significativos sobre o meio ambiente através do gerenciamento de risco e melhoria contínua do desempenho ambiental aliada a produtividade. Dentre os compromissos à proteção do meio ambiente podemos citar a prevenção a poluição pela eliminação ou redução do uso de recursos e materiais, reutilização, reciclagem ou recuperação; proteção da biodiversidade por meio da conservação direta do local ou indireta como a compra de materiais de fontes sustentáveis; e mitigação de mudanças climáticas pela redução de emissões de gases.

O ciclo contínuo em arranjo circular é justificado no aproveitamento dos resíduos na siderurgia, adequando a oportunidade de investimento e desenvolvimento de tecnologia para o reaproveitamento dos recursos naturais reduzindo a exploração de reservas finitas de minério de ferro no sistema produtivo aliada a proposta de uso

dos resíduos e subprodutos do setor industrial como insumo a demais cadeias produtivas.

No cenário atual, os resíduos siderúrgicos presentes para desenvolvimento como coprodutos em processos de sinterização são os ricos em ferro como os finos, pós, lamas e carepas. Desta forma, fica claro a utilização de sínter em aciaria elétrica substituindo a sucata metálica atuando de forma refrigerante no banho.

1.1 Objetivo

O sínter é o resultado da aglomeração de finos de minério de ferro e outros coprodutos, por meio do processo de sinterização.

O presente estudo objetiva a validação da utilização de resíduos sólidos em processos siderúrgicos com o desenvolvimento do coproduto em forma de sínter para posterior aplicação na produção de aço em aciaria destinada como carga metálica na substituição de sucata e controle de temperatura pela ação refrigerante no banho.

1.2 Justificativa

O propósito do trabalho busca atender à disposição interna de resíduos sólidos reduzindo o consumo de recursos naturais no desenvolvimento de coprodutos e aperfeiçoamento do processo de reciclagem sinterização, a fim de agregar valor fortalecendo a competitividade no processamento pela utilização de tecnologias mais limpas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Mineração

Definindo mineração, conforme CNI (2012), é o processo de extração de minerais ou compostos minerais de valor econômico, caracterizado como indústria primária em que os produtos gerados são utilizados como matérias primas. Compreende as etapas de pesquisa, mineração e transformação mineral destacando como atividades respectivamente a descoberta e estudo das jazidas que representam viabilidade técnica, econômica e ambiental; a exploração da lavra e início dos tratamentos mecânicos com cominuição e briquetagem adequando a granulometria; e agregação de valor a matéria prima destinada a siderurgia pelos processos de sinterização e pelotização.

A qualidade do minério de ferro é definida através de três características: a granulometria, característica física compreendendo o tamanho das partículas; a composição química com significância no teor de ferro total e redução de impurezas; e metalúrgica medida por indicadores de performance nos processos siderúrgicos.

IBRAM (2012) comenta que o teor médio de ferro encontrado nos parques de mineração brasileiros correspondendo a 50,3% Fe na representação de 11,7% das reservas mundiais exploradas principalmente pelas empresas Vale, Samarco Mineração S/A., Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), Nacional de Minérios S/A., Mineração Usiminas e Anglo Ferrous Amapá Mineração, representando 88,8% da produção nacional. O Brasil conta com uma das maiores reservas minerais de ferro do mundo se apresentando de forma competitiva pois apresenta pequenas quantidades de elementos indesejados como enxofre, alumínio, fósforo e carbonatos.

Os principais estados brasileiros detentores de reservas de minério de ferro são: Minas Gerais (70% das reservas e teor médio de 46,9%), Mato Grosso do Sul (15,3% e teor médio de 55,4%) e Pará (13,1% e teor médio de 64,8%). (IBRAM, 2012)

A granulometria é um fator de grande importância na aplicação posterior, sendo desta forma caracterizada como minério granulado e minério aglomerado. Os

granulados são abastecidos diretamente nos fornos de redução e compreendem tamanho de 250mm a 50mm. Os aglomerados recebem os tratamentos de sinterização ou pelletização para uniformizar a granulometria dos minérios finos atingindo respectivamente granulometria de 50mm a 15mm em “*sinter feed*” e menos de 15mm em “*pellet feed*”. IBRAM (2012) nos posiciona nas quantidades geradas destes produtos na exploração das principais empresas no país.

Por tipo de produto a produção se dividiu em: granulados (10,5%) e finos (89,5%), esses distribuídos em *sinter feed* (61,7%) e *pellet feed* (27,8%). A pelletização absorveu 56,7% da produção de minério do tipo *pellet feed*. (IBRAM, 2012)

Desta maneira, as designações comercialmente aplicadas no setor mineralógico para as classificações de minérios de ferro são:

- Lump: Minério granulado com maior valor de mercado devido a sua maior granulometria. Aplicado na siderurgia diretamente nos altos fornos sem necessidade de beneficiamento.
- Sinter feed: Finos apresentados como resultado do processo de britagem que são classificados posteriormente pela concentração de teor de ferro obtendo desta forma valor comercial.
- Sínter: Aglomerado com adequação de granulometria para aplicação em usinas siderúrgicas após o processo de sinterização.
- Pellet feed: É a parte mais fina dos produtos de minério de ferro e o mais barato. Necessário o processo de pelletização para adequação de granulometria e aplicação na indústria siderúrgica em forma de pelotas.
- Pellets: Pelotas em formas esféricas com o objetivo do aproveitamento da parte mais fina do minério de ferro (*pellets feed*). Através do processo de pelletização ocorre a transformação em aglomerados de granulometria de 8mm a 18mm apresentando propriedades metalúrgicas superiores ao granulado devido a uniformidade.

Os rejeitos de mineração podem ser aplicados com o desenvolvimento de processamentos tecnológicos, mas a barragem é o método mais comum no país para disposição desses rejeitos conforme afirmação da CNI (2012), representando sérios

riscos. Também são verificadas emissões encontrando material em suspensão atmosférica, principalmente de particulados, atingindo não necessariamente somente o meio ambiente como a saúde humana, sendo necessário seu controle e gestão.

No ramo siderúrgico, QUARESMA (2009) diz que é realizada a recuperação dos resíduos de 75% entre o produto bruto e o comercializado nas próprias minas.

O aproveitamento de resíduos sólidos não é voltado particularidade como processo de reciclagem, MOURÃO (2008) salienta a importância em intensificar investimentos em pesquisa pois as reservas conhecidas e declaradas mundialmente são suficientes para suportar as operações de produção nos próximos 20 anos devido à redução de reservas de hematita e produção de granulado.

Com relação a composição química, os minérios de ferro apresentam performance de forma distinta nos processos de mineração e siderúrgico sendo classificados de acordo com o composto metálico: óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos representados na Tabela 1. MOSZKOWICZ (2004) descreve as denominações dos minérios de ferro explorados para fins comerciais no Brasil.

O minério de ferro explorado no Quadrilátero Ferrífero pode ser dividido em dois grupos principais: o minério itabirítico e o minério hematítico (de alto teor). Esses minérios são classificados de acordo com o conteúdo mineral e a textura. O minério itabirítico é definido pela alternância entre bandas constituídas de óxidos de ferro e bandas constituídas de sílica, de espessuras que variam de milimétricas a centimétricas, e com teores de ferro variando entre 20% e 55% de Fe total. Do ponto de vista textural, esse tipo de minério pode ser compacto, friável ou pulverulento, dependendo da intensidade de atuação dos processos superficiais de decomposição. [...]

Os corpos de minério hematítico são mais homogêneos, constituídos basicamente de hematita – portanto, ricos em ferro (teores superiores a 64%) – e encontrados em proporções variáveis na forma de lentes imersas das camadas de itabirito. (MOSZKOWICZ, 2004; p.199-200)

O minério de ferro utilizado pelas usinas siderúrgicas é uma mistura de tipos de minérios geológicos denominado minério de ferro metalúrgico. Desta forma as usinas siderúrgicas aceitam características químicas e físicas de acordo com o desempenho de seus processos. São utilizadas duas classificações para comercialização dos minérios de ferro: minério base e minério de adição, este último para correção compreendendo características químicas e físicas diferenciadas (LEMOS et al, 1978).

Tabela 1 – Principais minerais de ferro e suas classes

CLASSE	NOME MINERALÓGICO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MINERAL PURO	TEOR DE Fe (%)	DESIGNAÇÃO COMUM
ÓXIDOS	Magnetita	Fe_3O_4	72,4	Óxido ferroso-férrico
	Hematita	Fe_2O_3	69,9	Óxido férrico
		$HFeO_2$ – Goethita	62,8	Hidróxido de ferro
		$FeO(OH)$ –Lepidocrocita	62,85	
CARBONATO	Siderita	$FeCO_3$	48,2	Carbonato de Ferro
SULFETOS	Pirita	FeS_2	46,5	
	Pirrotita	FeS	63,6	
SILICATOS	Fayalita	$Fe^{2+}_2(SiO_4)$	54,81	Grupo da Olivina
	Laihunita	$Fe^{2+}Fe^{3+}_2(SiO_4)_2$	47,64	Grupo da Olivina
	Greenalita	$Fe^{2+}_{2,3}Fe^{3+}_{0,5}Si_{2,2}O_5(OH)_{3,3}$	44,14	Grupo da Serpentina
	Grunerita	$Fe^{2+}_7(Si_8O_{22})(OH)_2$	39,03	Grupo dos Anfibólios
	Fe-antofilita	$Fe^{2+}_7(Si_8O_{22})(OH)_2$	39,03	Grupo dos Anfibólios

Fonte: TAKEHARA, 2004 (et. al. POVEROME, 1999; et. al. DEER, 1994; et. al. DANA &HULBURT, 1984)

2.2 A Siderurgia

A siderurgia é o ramo da metalurgia baseada no conjunto de técnicas e conceitos abrangentes a extração, purificação, e modificação de metais ferrosos aplicados aos processos industriais de obtenção e tratamento de aços.

O elemento ferro é encontrado na natureza associado ao oxigênio e sílica em forma de jazidas de minério de ferro. Para obtermos as características aplicáveis para esse elemento é necessário a redução do minério a partir da reação de redução com

carbono, adequação de composição química e tratamentos termomecânicos formando a liga de aço que garante as propriedades desejadas para emprego no mercado na aplicação do dia-a-dia.

Desta forma, conforme a ABNT NBR 6215:2011, aço são 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, além de ser possível a ocorrência da deformação plástica.

O mercado brasileiro utiliza aço em diversas aplicações rotineiras nos setores da construção civil, automotivo, bens de capital, dentre outras aplicações demonstrados conforme proporções na Figura 1.

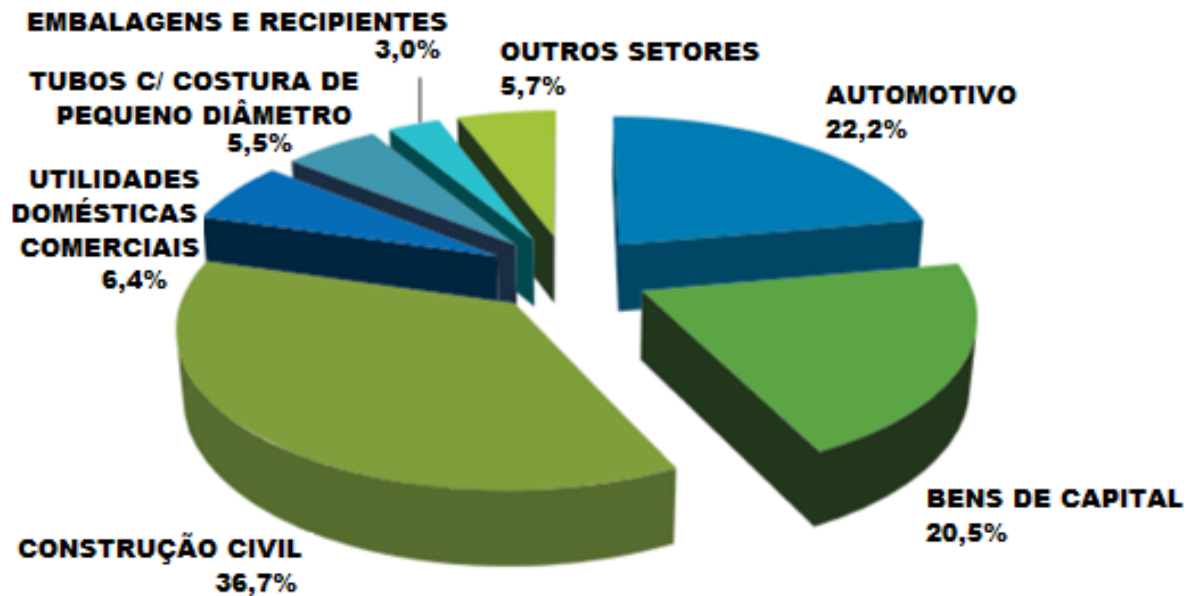
Figura 1- Participação dos setores consumidores de aço no Brasil.



Fonte: Instituto Aço Brasil, 2014

As aplicações diárias no cotidiano exercendo o potencial da aplicação do aço é verificada através da Figura 2 com os exemplos das construções e automotivos.

Figura 2 - Aplicação usual de aço no dia-a-dia.



Fonte: National Geographic Production, 2006

Dentre as rotas tecnológicas de obtenção do aço em indústrias siderúrgicas observam-se: usinas integradas, semi integradas e não integradas, nos seguimentos de aços longos e aços planos. Os processos são distintos subdivididos em mineração; reflorestamento; redução e refino do aço; laminação a quente, a frio e trefilação.

As usinas integradas são empresas de grande porte que utilizam como matéria prima o minério de ferro seguindo as etapas para obtenção do aço, como pode ser visualizada na Figura 3:

- Extração do ferro de seu minério através de processos de redução;
- Refino para conversão do ferro gusa em aço;
- Solidificação através do lingotamento contínuo;
- Conformação mecânica do metal na forma de produto nas laminações e trefilação.

Exemplos de usinas integradas brasileiras são: CSN (Volta Redonda), Gerdau (Ouro Branco), Usiminas (Ipatinga e Cubatão).

Figura 3 - Processos de usina integrada.



Fonte: Adaptado de GEGENHEIMER, 2007; GERDAU, 2011

Nas indústrias semi integradas, a produção de aço compreende as três últimas etapas: refino, lingotamento e laminação, conforme Figura 4. Utiliza-se a sucata ferrosa como principal matéria prima e tem a eletricidade como principal fonte de energia. Como usina atuante pode-se citar a Votorantim Siderurgia (Barra Mansa e Resende).

Figura 4 - Processos de usina semi integrada.

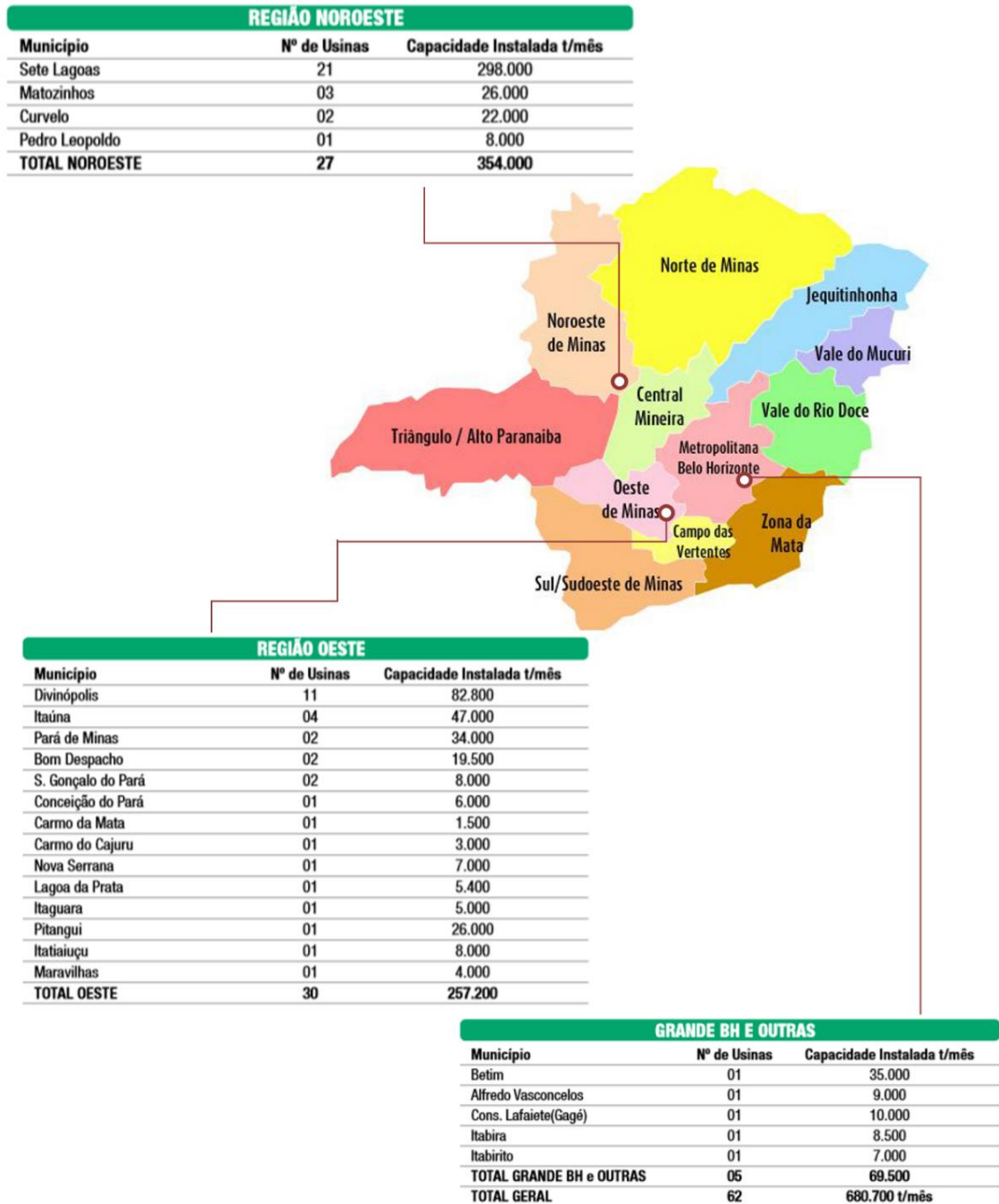


Fonte: Adaptado de GEGENHEIMER, 2007; GERDAU, 2011

As usinas não integradas operam apenas uma fase do processo, como a redução do minério de ferro para obtenção de ferro gusa em usinas mercadologicamente denominadas “guseiros” em Minas Gerais. O mercado em Minas Gerais atingiu 2,9 milhões de toneladas de produção independente de ferro gusa correspondendo a 57% da produção brasileira conforme SINDIFER (2014).

A distribuição dos produtores independentes de ferro gusa no parque em Minas Gerais pode ser observado pela Figura 5.

Figura 5 - Parque mineiro de produtores independentes de ferro gusa



Fonte: Adaptado de SINDIFER, 2014

2.2.1 Principais Insumos na Siderurgia

Sendo aço uma liga de ferro e carbono, o minério de ferro é a matéria prima mais utilizada nos parques industriais das usinas integradas. Encontrados na crosta terrestre, o minério de ferro possui impurezas ora prejudiciais para aplicação direta no mercado sendo necessário sua purificação. Para isso, são necessários os processos de redução e refino na adequação de composição química, e assim posteriormente, nas propriedades dos aços. Contabilizando os finos de minério de ferro e os resíduos sólidos retornando ao início do processo produtivo, são aplicados ainda pelota e sinter.

No alto forno, são abastecidos os materiais: minério de ferro, carvão e calcário. Durante o processo de redução é observada a fusão destas matérias primas atingindo temperatura de 1200°C a 1500°C formando o ferro gusa líquido.

O carvão mineral após coqueificado (coque) ou carvão vegetal são as fontes de calor e carbono atuando como combustível no processo de redução do minério de ferro. A diferença entre eles é a forma de obtenção em que o carvão mineral é obtido de carvão fóssil e o carvão vegetal é a carbonização de madeira de reflorestamento sendo um recurso natural renovável. Colaborando no controle de combustão do carvão ainda podem ser adicionados injeções auxiliares de gás natural, carvão pulverizado e óleo combustível.

O calcário é o fundente mais utilizado no processo do alto forno, aplicado como escorificante garante características de fluidez a escória facilitando a ocorrência de reações de separação entre metal e escória, assim como a retenção das impurezas.

O ferro gusa é abastecido no misturador ou carros torpedos a fim de transporte e manutenção da temperatura de operação sendo transferido para a próxima etapa de refino no conversor. Em usinas não integradas, o ferro gusa é solidificado nos denominados “pães de gusa”.

No conversor são adicionadas ao ferro gusa, líquido ou sólido - dependendo a rota tecnológica utilizada - a sucata, cal e oxigênio. A função da sucata é compor a

carga metálica, a cal é escorificante, e o oxigênio é catalizador nas reações principalmente com carbono, mas também tem influência sobre outros elementos como o fósforo, a sílica e o manganês, minimizando a ação destes no aço.

As ligas metálicas específicas ao tipo de aço que se deseja produzir são adicionadas posteriormente no forno panela durante o processo de refino secundário para aferir a composição química e controle de inclusões. Dentre essas ligas podemos observar: ferro-manganês, ferro-cromo, ferro-silício, ferro-níquel, ferro-molibdênio, ferro-vanádio, ferro-titânio, ferro-nióbio, ferro-boro. Também podem ser adicionados alumínio, cálcio-silício, grafite, cobre e outros.

Agora como aço líquido, o material é transportado para o lingotamento conferindo a geometria necessário para o processo de conformação mecânica pelo resfriamento do mesmo pela ação de “*sprays*” de água.

2.2.2 Extração do ferro de seu minério através de processos de redução

Alto fornos são reatores que garantem a condição de fusão redutora para extração de ferro a partir de seu minério. É a rota tecnológica mais viável aplicada no mercado. Outra solução encontrada é a redução direta com obtenção de ferro esponja, menos aplicada devido ao inferior rendimento metálico.

Para geração da condição redutora nos altos fornos, são aplicados ao processo carvão vegetal ou coque sob temperaturas elevadas e adicionados fundentes para promover a formação de escória mais facilmente na obtenção do produto ferro gusa.

O minério de ferro pode ser abastecido nas formas granuladas ou como aglomerados, sinter ou pelotas. Conforme TAKEHARA (2004), a carga metálica utilizada é composta, nos altos fornos brasileiros, por 80% de produto sinterizado (SOUZA NETO et al., 1998) e o restante através de granulados ou pelotas. Esta afirmação consolida a necessidade do conhecimento dos parâmetros do processo de sinterização e a caracterização do sinter. De acordo com BUZIN (2009), o controle da granulometria é decisivo para manter a permeabilidade da carga favorecendo a

transferência térmica pelo fluxo de gases além de reduzir a proporção de gases no sistema de exaustão.

A formação da escória promove reações para a primeira retirada de impurezas que estavam contidas no minério de ferro. A basicidade da escória é um parâmetro importante favorecendo as reações, podendo atingir o valor da relação CaO/SiO_2 de 1,2 para os altos fornos, conforme MACHADO (2007), promovendo uma escória líquida e fluida. Uma dessas reações é a dessulfuração para retirada de enxofre reduzindo o impacto de fragilidade a quente no aço. Para favorecer esta reação a escória tem que ser rica em CaO, sendo assim básica, sobre a ação de atmosfera redutora.

Conforme MACHADO (2007), a composição química aceita de gusa líquido para aplicação em aciarias LD é de 3,5 a 4,3% de carbono; 0,4 a 0,8% de manganês; 0,4 a 0,8% de silício; teores menores de 0,20% de fósforo e teores menores de 0,04% de enxofre. A limitação do percentual de silício é devido à influência na basicidade e necessidade de adição de cal e formação de escória; além de ser um elemento que proporciona a elevação do calor no banho, elevando assim a quantidade de refrigerante para controle de temperatura. O manganês também interfere na quantidade formada de escória.

2.2.3 Refino para conversão do ferro gusa em aço

As aciarias são as áreas com a finalidade de produção dos aços dentro da siderurgia. Para isso, são aplicados o ferro gusa ou sucata ferrosa como matéria prima, a cal para atuar como escorificante, e oxigênio para desenvolver as reações principais no processo oxidante.

São vários os processos de obtenção dos aços, sendo classificados pelo tipo de forno aplicado e a natureza da escória. Dentre os fornos podemos destacar Bessemer, Siemens-Martin, LD, Elétrico, etc., sendo os mais usuais os processos LD e fornos elétricos.

Dentre os resultados do processo de refino nas aciarias, são esperados: redução dos teores de carbono, silício, fósforo, enxofre e nitrogênio; ajuste dos elementos de liga para adequação de propriedades mecânicas dos aços; e ajuste de temperatura para posterior envio ao lingotamento. A oxidação do carbono é eliminada na forma de gás pela ocorrência de CO e CO₂ enquanto que o silício, fósforo e enxofre são eliminados pela escória.

A basicidade da escória é importante também no processo de aciaria, visto que impacta diretamente nas reações aço – escória e no desgaste dos refratários. Os escorificantes normalmente aplicados são a cal (CaO), cal dolomítica (MgO) e fluorita (CaF₂), conforme JOHN (et.al.,2009). A escória básica também favorece a reação de desfosfatização, de extrema importância pois o fósforo é um elemento fragilizante a frio nos aços. De acordo com MACHADO (2007), pode-se reduzir 90% de fósforo pela adição de cal no processo de refino sendo o melhor momento a temperaturas mais baixas no início do sopro de oxigênio. O ataque das escórias sobre os refratários é exercido de forma que escórias ácidas atacam refratários básicos e vice-versa.

Referente aos fundentes, a adição da cal tem as finalidades de neutralizar os óxidos ácidos formados nas reações de oxidação evitando o ataque ao refratário do forno, conforme GEYER (et.al., 2001). A fluorita reduz a temperatura de fusão e viscosidade das escórias sendo adicionada ao mínimo em aproximadamente 3% da cal. A cal dolomítica tem ação favorável a dissolução da cal, porém sua principal atuação é na redução do consumo de refratário. A viscosidade da escória deve ser acompanhada pois esta deve ser fluida a ponto de escoar livremente quando removida do forno além de estar relacionada com a velocidade das reações, ou seja, uma escória com baixa viscosidade promove maiores velocidades de reação, sendo um fator de cinética do banho. Assim, deve-se otimizar o valor de viscosidade da escória permitindo sua fluidez, sabendo que escórias muito ácidas ou muito básicas são normalmente muito viscosas. Além disso, a espessura das escórias tem que ser mínima para não dificultar a passagem de CO₂ e CO na eliminação de oxigênio do banho de acordo com MACHADO (2007).

O revestimento refratário de um convertedor é aplicado três vezes maior a sua capacidade, visto o consumo durante o processo da aciaria, em função da qualidade

do refratário e das práticas operacionais no controle da basicidade e molhabilidade da escória, e redução da porosidade dos tijolos. A Tabela 2 demonstra os tipos de refratários e as respectivas composições químicas.

Tabela 2 – Composição química de tijolos refratários

TIPO	MgO (%)	CaO (%)	SiO₂ (%)	Fe₂O₃ (%)	Al₂O₃ (%)
Magnésia Alcatroado	94,9	0,6	1,2		
Magnésia Queimada	95,7	0,5	1,2		
Doloma Curado	>37	<60	<1	<1	2-4
Doloma Magnésia Curado	72,6	20,3	1,6	0,7	

Fonte: MACHADO, 2007

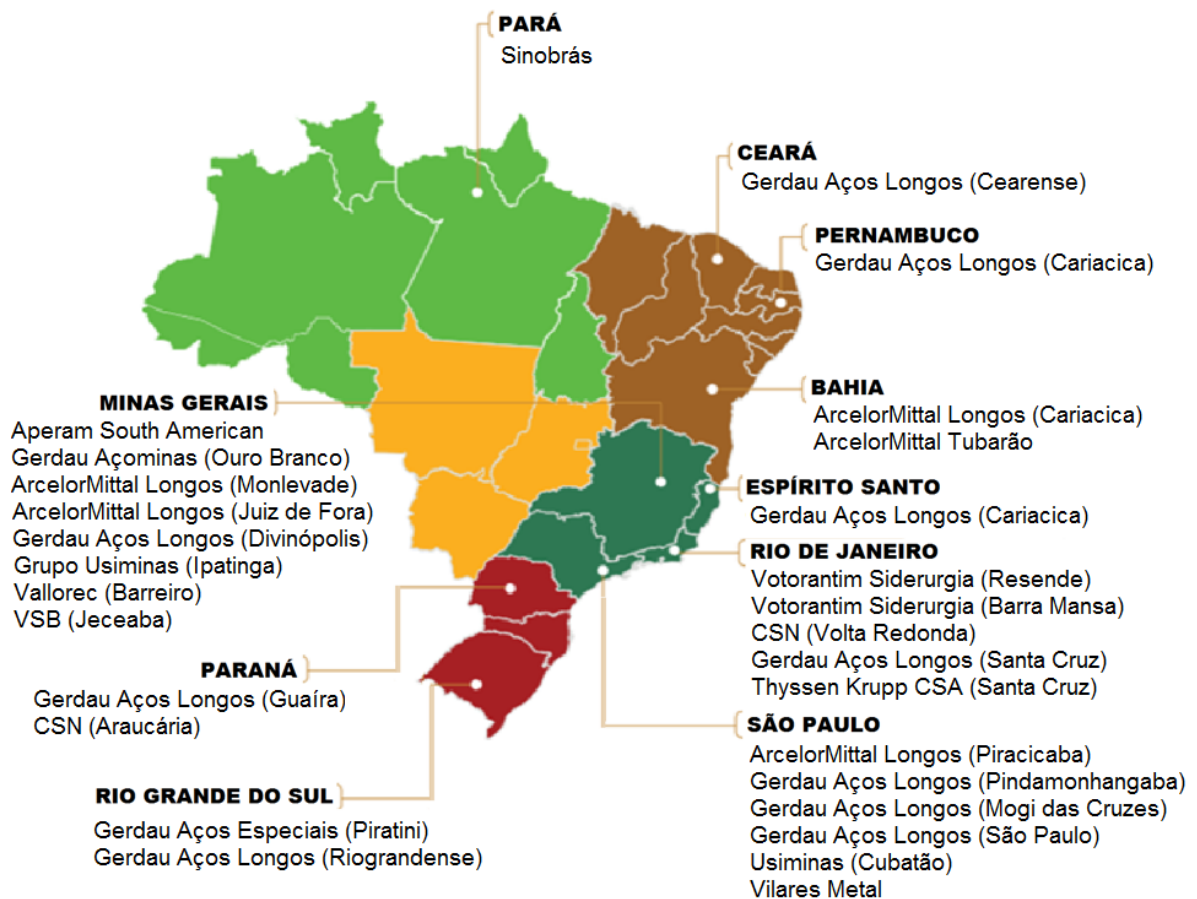
No controle de temperatura do banho, são visados os teores do óxido de ferro com ação fortemente refrigerante quando empregado no final do sopro de oxigênio após a descarburagem retirando calor do banho, podendo ser empregado na substituição parcial de sucata. Esta é uma das aplicações nas aciarias esperadas para o sinter desenvolvido neste trabalho.

Um dos aspectos de extrema importância no final do processamento nas aciarias é a formação de bolhas e inclusões durante o vazamento do aço devido a solubilidade do oxigênio, nitrogênio e hidrogênio após o refino primário. Desta forma a metalurgia da panela é o refino secundário com adequação da composição química e temperatura realizando as atividades de tratamento a vácuo para remoção de gases, agitação por borbulhamento de gás para homogeneizar o banho, mistura completa das adições, refino do aço pelo uso de escórias sintéticas, manutenção de atmosfera de gás inerte na panela e aquecimento do aço líquido.

2.2.4 Atual Geração de Resíduos Sólidos Siderúrgicos

Em 2014 a produção do aço bruto no Brasil totalizou 33,9 milhões de toneladas equivalendo aproximadamente 2% da produção mundial conforme o Instituto Aço Brasil, atingindo o posicionamento de 1° no “*ranking*” da América Latina e 9° produtor mundial no setor siderúrgico. É constituído por 11 grupos empresariais operando 29 usinas, sendo 14 empresas integradas e 15 semi integradas, locadas em 10 estados sendo o atendimento ao mercado interno prioritário com capacidade de produção superior a demanda interna, podendo ser verificada através da Figura 6.

Figura 6 – Localização das empresas produtoras de aço no país

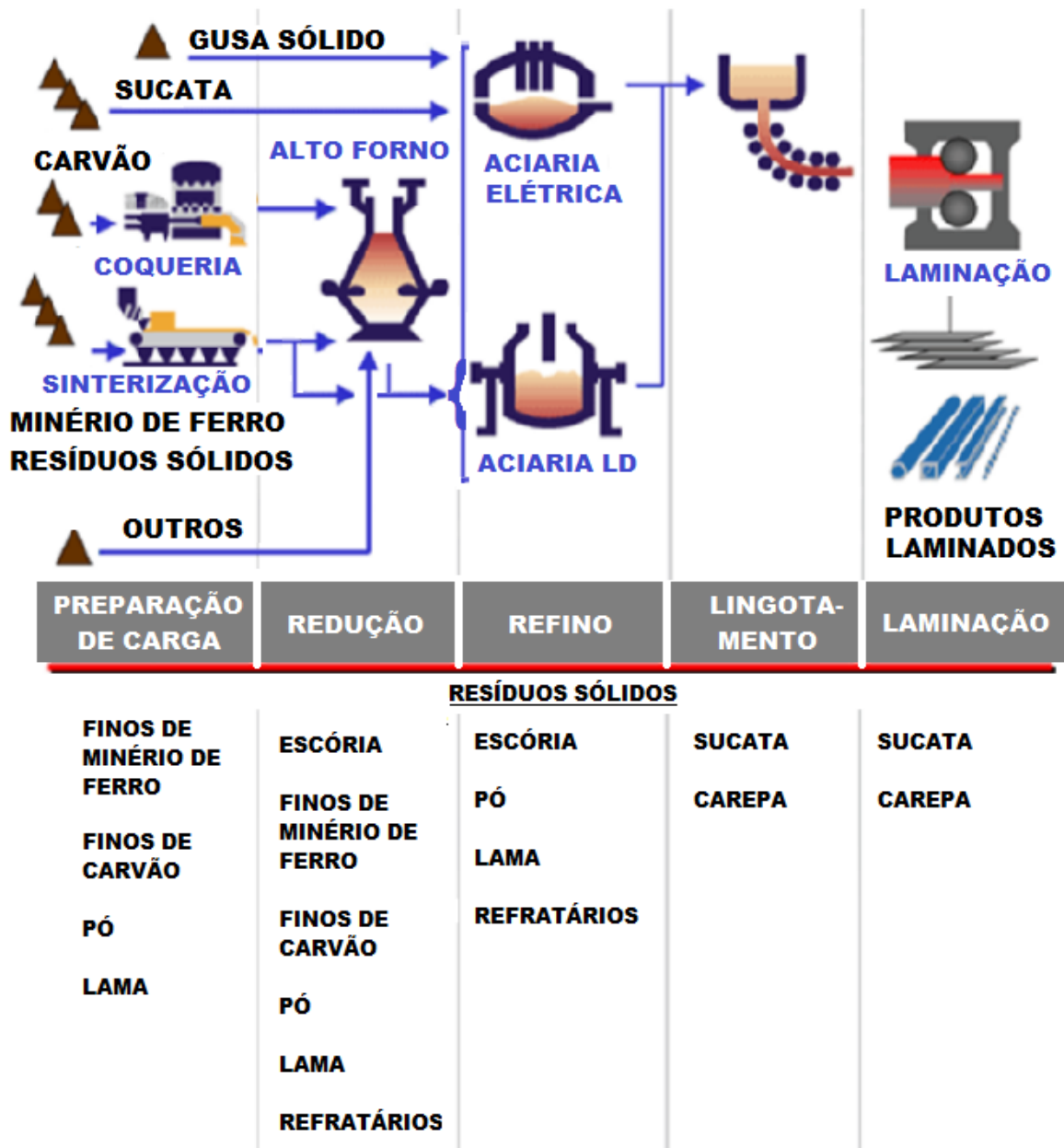


Fonte: Adaptado de CNI, 2014

A competitividade empresarial é foco de estudo nas organizações siderúrgicas delineando o aproveitamento de resíduos, bem como o retorno econômico deste

processo pela redução de custo e retorno de impostos no produto final, sendo incentivados pelo governo. O esquema de processamento do aço com seus respectivos resíduos sólidos pode ser acompanhado através da Figura 7.

Figura 7 – Fluxo de produção do aço e geração de resíduos sólidos

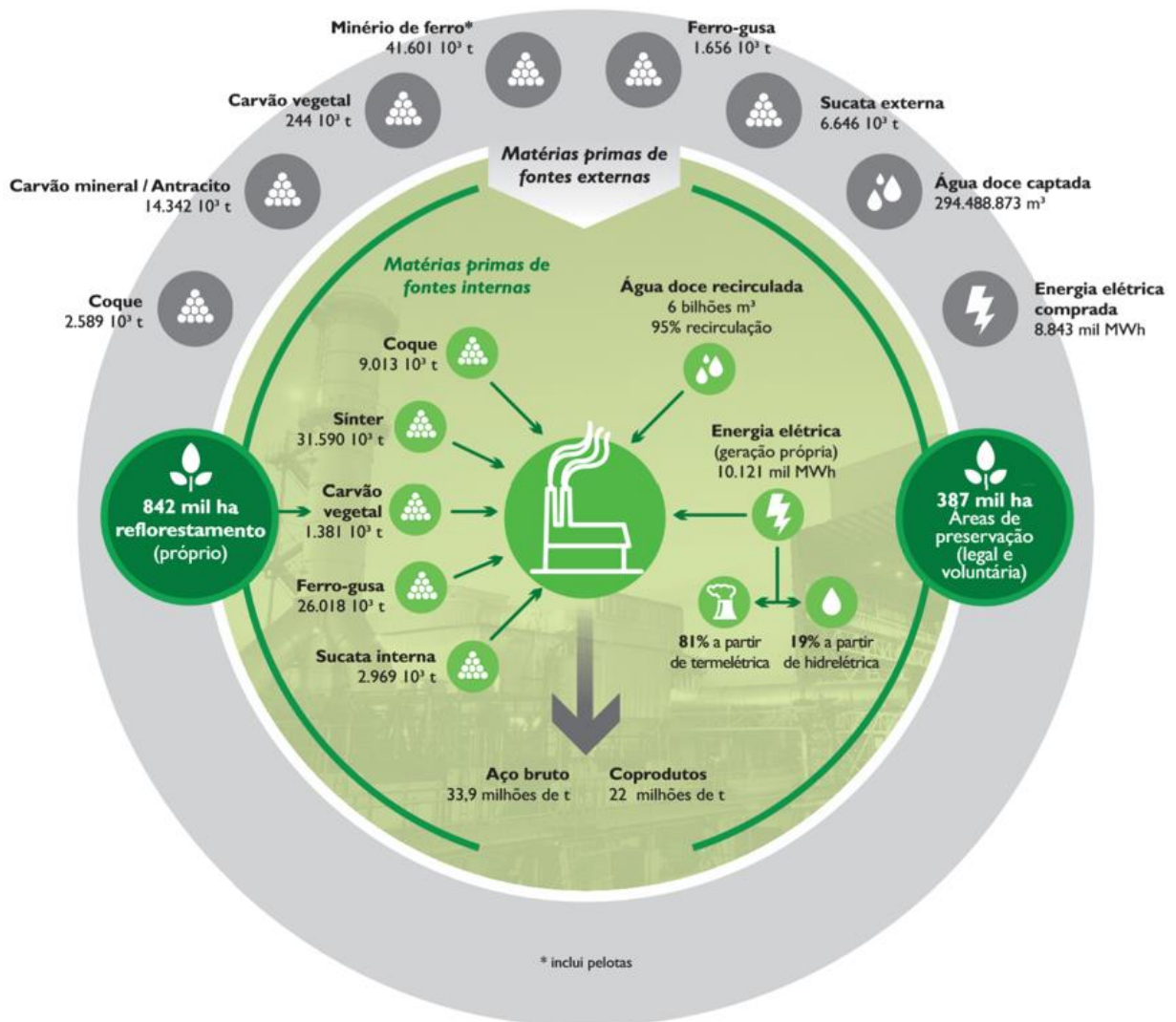


Fonte: Adaptado de SANTOS, et. al. IBS, 2006

O momento do aço na economia mundial é delicado, apresentando um excedente de 719 milhões de toneladas do produto segundo dados do Instituto Aço Brasil justificando a redução de custo pelo aproveitamento de resíduos sólidos.

O aço é considerado o material mais reciclável do mundo. Nos processos de reciclagem são adequadas as composições e não há perda de qualidade. Através da Figura 8 podemos observar todas as entradas de iniciativas na agregação de valor aos coprodutos da produção brasileira do aço, podendo ser utilizados em diversas aplicações.

Figura 8 – Desempenho ambiental em 2014



Fonte: Instituto Aço Brasil, 2014

Considerando o setor brasileiro na indústria do aço, FIRJAN (2014) demonstra a estratificação de resíduos sólidos e salienta que para cada tonelada de aço, 594 kg

de resíduos sólidos são fomento da utilização de coprodutos como insumo à sinterização.

Em 2013, os principais coprodutos gerados pela indústria do aço foram as escórias de alto-forno (37%), escória de aciaria (29%), seguidos de finos e pós (14%), lamas (5%), carboquímicos (2%) e outros (13%). [...] Em 2013, 88% dos materiais gerados foram reaproveitados caracterizando-se como coprodutos, 6% destinados ao estoque e os outros 6% enviados à disposição final em aterros. (FIRJAN, 2014 p.126 - 127)

2.2.5 Tipos de Resíduos Sólidos Siderúrgicos

Os resíduos sólidos são os materiais destinados a aterros após a produção do aço abordando a visão de ineficiência do processo com perda de material, energia e altos custos. Quando reprocessados para serem novamente aplicados nos processos siderúrgicos são chamados coprodutos.

Referências bibliográficas abordam vários desenvolvimentos de tecnologias economicamente viável permitindo a aplicação dos coprodutos como matéria prima ou fonte de energia no processamento de forma ambientalmente correta.

Os resíduos sólidos reaproveitáveis no processo são vistos em quatro grandes grupos: os recicláveis contendo ferro, os finos de coque, as escórias e a sucata. Dentre os recicláveis contendo ferro a geração corresponde a 200kg, com 25 a 85% em massa, para cada tonelada de aço na forma de produto acabado.

Abaixo uma breve descrição das classificações destes resíduos sólidos:

a) Escória de alto forno: 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 CO₂ e recurso natural pelas jazidas de calcário.

b) Escória de aciaria: Oriunda no 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.

c) Finos, pós e lamas: Provém da manipulação da matéria prima ou são oriundas nos sistemas de tratamento de efluentes e no despoeiramento dos conversores variando de 13% a 20% do total de resíduos gerados no grupo de resíduos ricos em ferro, sendo: 10% na forma de pós, 50% em finos e 20% em lamas. Apresentam uma granulometria fina e no caso das lamas são verificados altos teores de umidade. Ainda na aplicação das lamas, estas atingem aproximadamente 60% de ferro total em sua composição e o valor de 36kg/t de aço em sua geração sendo necessário o cuidado na aplicação pois podem conter teores de zinco (Zn) que devem ser eliminados no processo de sinterização para que o óxido de zinco não comprometa a aplicação no alto forno ficando depositado nas paredes da cuba interferindo no controle termodinâmico ou nos condutores interrompendo a saída de gases. Outro ponto de atenção são os teores de chumbo e cádmio que lixiviam em água contaminando os lençóis freáticos.

Referente aos pós, o pó de alto forno e coqueria são ricos em carbono (C) minimizando o consumo de combustível na sinterização e a composição varia de aproximadamente 25 a 40% de Fe, 40 a 45% de C, 5 a 7% de SiO₂ e 2 a 4% de CaO de acordo com MACHADO (2006). Os pós de calcinação são originários na aciaria na preparação da cal, assim como a cal peneirada da própria sinterização.

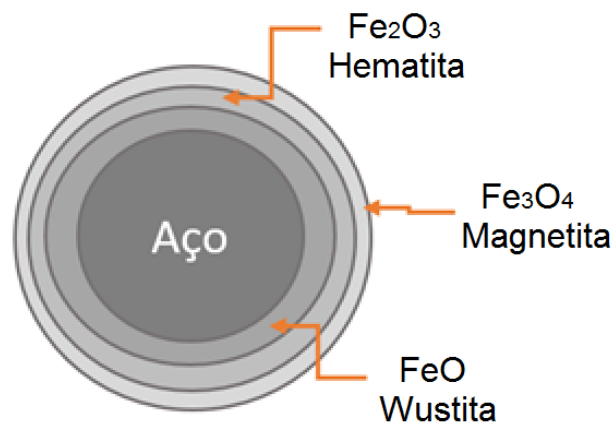
A lama é formada pela remoção do pó no gás através de seu tratamento nos lavadores e espessadores com fundo cônico, podendo atingir 30 a 50% na coleta de sedimentos sólidos. Nos tanques de concreto a parte no centro recebe a água dos lavadores e através de um eixo com braços e raspadores exerce movimento circular recolhendo o sedimento no centro do reservatório com a saída da água pelos vertedouros em torno da circunferência do tanque. A lama é encaminhada para o sistema de filtragem e enviada para sinterização com 25% de umidade.

d) Refratários: materiais aplicados nos fornos da aciaria e alto forno como revestimentos de equipamentos cuja função básica é de conter o metal líquido

isolando-o termicamente. A estimativa de geração fica em torno de 32% de sucata refratária por vida útil do total de refratários aplicados.

e) Carepas: 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. A Figura 9 ressalva os tipos de carepa encontrada no aço.

Figura 9 – Diversas camadas de óxido da carepa.



Fonte: Autor, 2015

f) Sucata Metálica: Refugo do processo retornando à aciaria elétrica para aplicação como matéria prima. São encontradas no interior da própria siderúrgica como pontas de lingotes, tarugos, placas ou chapas; ou externa com risco de contaminação como na sucata de obsolescência ou de estamparia e prensagem.

As causas para a existência destes resíduos sólidos são observadas através da redução no rendimento metálico notado entre a diferença em peso da matéria prima na entrada e o produto na saída do processo. Pode-se fundamentar este conceito pela constatação de impurezas na matéria prima e materiais auxiliares que não são incorporados ao produto final, assim como reações secundárias.

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 Apelo Ecológico

As empresas brasileiras do setor siderúrgico se baseiam no desenvolvimento sustentável do meio ambiente por meio de tecnologia em processos abordando o equilíbrio social, ambiental e econômico da organização. Desta forma consolida a visão de compromisso por soluções sustentáveis a aplicação dos resíduos dentro da própria empresa além de buscar outras alternativas de consumo. Como exemplo podem ser citadas as iniciativas como: a utilização de agregados de alto forno e aciaria para a fabricação de cimento ou pavimentação de vias; reciclagem de pós e lamas coletados nos sistemas de controle de poluição substituindo a matéria prima e assim reduzindo o consumo de recursos naturais não renováveis.

No caso do aço, conforme MACHADO (2006), para 2,19t de minério de ferro adicionados a sucata e outros insumos, são produzidos: 1t de aço bruto; 0,87t de materiais não incorporados ao aço; e 0,32t de escória. Estas relações nos fazem pensar em condições insustentáveis associadas a quantidade de energia desprendida e recursos renováveis, porém tecnologias possibilitam a redução dos impactos negativos dos processos siderúrgicos.

Expondo o ciclo de vida do aço são observadas diversas aplicações nas áreas industriais, da construção civil, instalações de infraestrutura e na agropecuária. O aço é dito 100% reciclável com o aproveitamento da sucata de ferro e aço de pós consumo, assim como a sucata interna das próprias usinas e seus resíduos. A minimização dos impactos ambientais é resultado da redução do consumo da matéria prima minério de ferro, recurso natural não renovável, e o conceito de processos mais limpos são demonstrados nas certificações de selos ecológicos.

Em relação a legislação 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).

O estímulo a mudança nos processos é fundamentado na constante reciclagem e reutilização dos materiais reduzindo o descarte de resíduos e a utilização de recursos naturais dentro de conceitos da economia circular extraindo valor dos resíduos antes de serem retornados ao meio ambiente de maneira segura e produtiva.

A gestão integrada de resíduos requer integração de 4 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 e destino final.

Conforme FIRJAN (2014), no momento atual as empresas brasileiras pensam no ciclo de vida do produto e de suas embalagens segundo metodologia da ecoeficiência, dirigindo esforços a produção com menor impacto ambiental e redução de custos nas cadeias de produção atendendo a exigências legais impostas à performance dos produtos e ao seu destino final.

2.4 Processamento de Resíduos Sólidos na Siderurgia

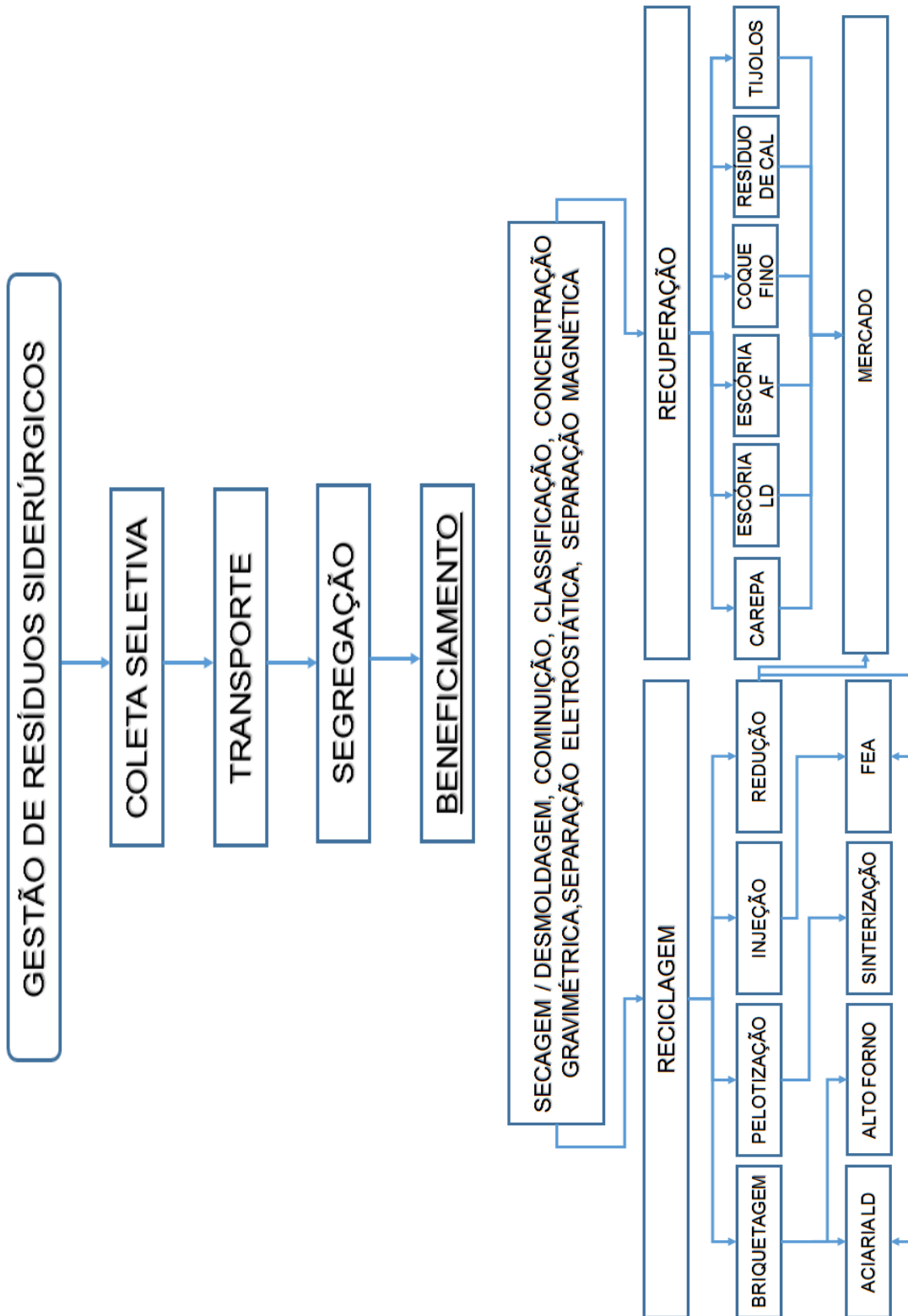
O modelo que valoriza os resíduos como matéria prima na forma de coprodutos fortalecendo o reuso e a redução do consumo com o desenvolvimento integrado de produto em instalações e plantas de recuperação ou processamento de resíduos mistos representa o esforço integrado na gestão de resíduos compreendendo a geração como ineficiência do processo.

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, objetivando o tamanho e forma de maneira que permita seu uso na produção de aço.

Dentre as etapas para o gerenciamento de resíduos sólidos, são observadas no fluxo da Figura 10 os processos de reciclagem para utilização dos coprodutos.

Dentre os processos acima descritos para reciclagem de resíduos sólidos, temos três processos que se destacam no ramo siderúrgico para a aglomeração de finos industriais, sendo a pelotização, a sinterização e a briquetagem. Os seus respectivos produtos são: a pelota, o sinter e o briquete.

Figura 10 – Gestão de resíduos siderúrgicos

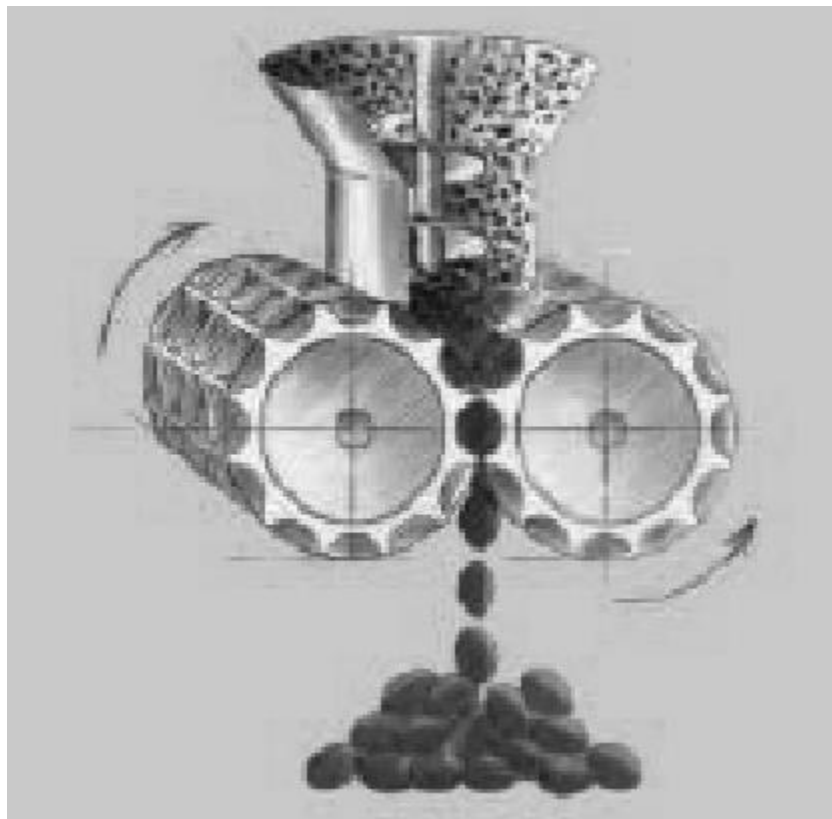


Fonte: SANTOS *et. al.* ABM, 2006

2.4.1 Briquetagem

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. Desta forma, estes materiais podem ser empilhados facilitando transporte e armazenamento. A Figura 11 demonstra o esquema de processamento por briquetagem.

Figura 11 – Princípio da compressão em prensa de rolos.



Fonte: KÖPERN (et. al.)

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.

Podem ser aplicados aglomerantes, ou não, para manter a coerência do produto após retirada a pressão sendo classificados de acordo com a função no briquete, tendo o aglomerante tipo matriz, película e químicos, segundo KOMAREK (et.al., 1967). 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. Conforme SAMPAIO, COSTA & ANDRADE (2007), o tipo de aglomerante tem impacto direto nas propriedades dos briquetes.

Aglomerantes do tipo matriz engastam as partículas em uma fase aglomerante substancialmente contínua. Portanto, as propriedades dos briquetes são determinadas, em grande parte, pelas propriedades do aglomerante. Aglomerantes do tipo película, como colas, geralmente, dependem da evaporação da água ou de algum solvente para desenvolver sua resistência. Aglomerantes do tipo solvente são usados algumas vezes, ainda que o material possa ser briquetado somente com pressão, visto que podem ser utilizadas pressões menores, e briquetes com uma estrutura mais porosa podem ser fabricados deste modo. Aglomerantes químicos podem ser tipo película ou matriz. Os aglomerantes químicos usados para areias de fundição são bons exemplos de aglomerantes do tipo película (Grandin, et. al., 1994; Komarek, et. al, 1967; e Roman, et. al, 1989).

Conforme CARVALHO & BRINCK (2010), o sistema de endurecimento ocorre a temperatura ambiente, em estufas ou fornos. Quando aplicado a temperatura ambiente, obtém-se briquetes com baixa resistência mecânica; quando o mesmo é submetido a temperatura elevada sendo aplicados a baixa pressão. Para a aplicação em estufas ou fornos ocorrem as reações de escorificação de impurezas do minério formando a matriz de ligação; e junto ao constituinte principal ainda podem ser verificados os processos de fusão incipiente, difusão e recristalização, e o endurecimento ou cristalização. No caso da briquetagem de minério de ferro e pós de alto forno deve ser aplicada a briquetagem a quente atingindo temperatura da ordem de 1000°C.

2.4.2 Pelotização

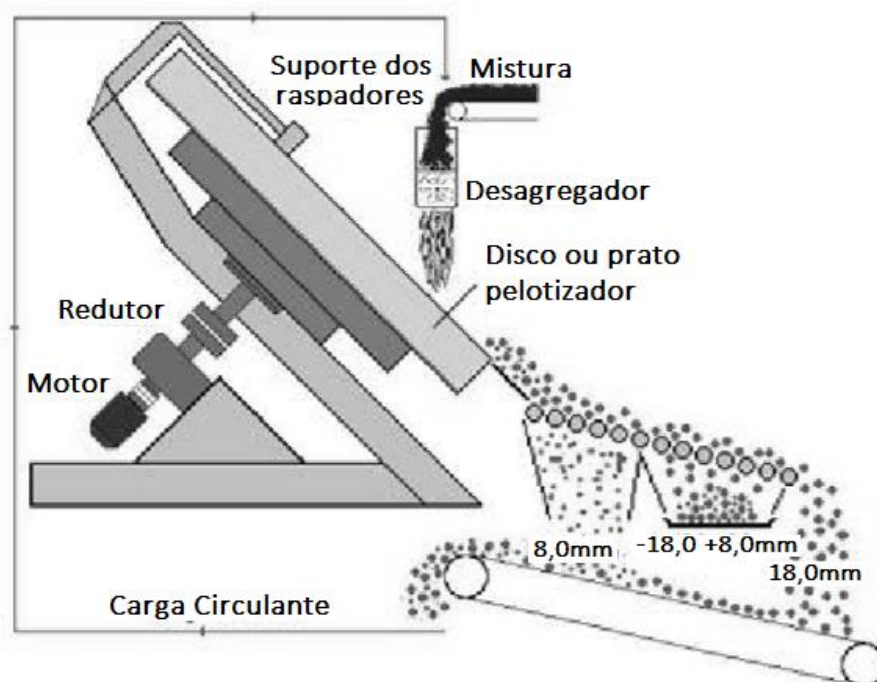
Segundo CNI (2012), a pelotização é o processo de compressão ou moldagem de um dado material na forma de “pellet” (pelota) apresentando-se em forma de esfera

e compreendido dentre três estágios: preparação das matérias-primas, formação das pelotas cruas e processamento térmico.

Foi desenvolvido para processo de aglomeração de finos com alto índice de pulverização, ou seja, com finos classificados abaixo de 15mm. Realizado com a condição de umidade constante e aplicação de aglutinante, passando pelo processo de secagem posteriormente, o que garante a resistência da pelota. Aplicados normalmente em finos de minérios ou concentrados de ferro pelas mineradoras apresentando o núcleo com partículas mais grossas cobertas por uma camada de partículas finas. Este processo é descrito por CAMPOS & FONSECA (2010) e demonstrado na Figura 12.

A 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, que depois de submetidas a um tratamento térmico específico, apresentam elevada resistência mecânica ao manuseio, e propriedades metalúrgicas superiores, quando submetidas ao processo de redução. (CAMPOS & FONSECA, 2010, pg. 705)

Figura 12 – Disco de Pelotamento



Fonte: FONSECA, et. al., 2003

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 e 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 conforme MOSZKOWICZ (2004).

O destino para aplicação são as indústrias siderúrgicas para a produção de ferro gusa em alto fornos possibilitando a passagem do ar durante o processo com relação de 1,68 toneladas de minério de ferro para cada tonelada de gusa, conforme Instituto Aço Brasil (2016).

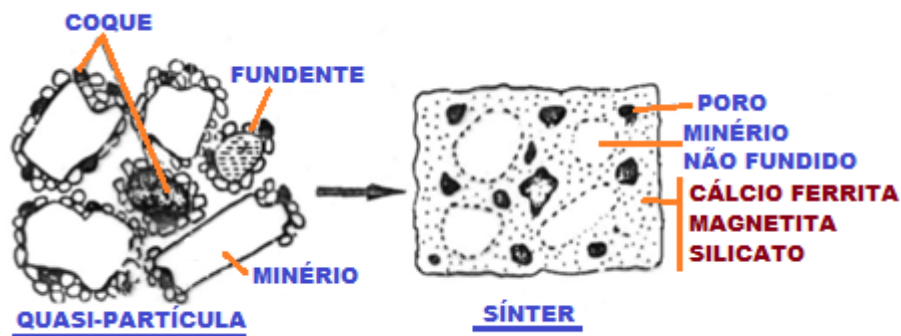
A pelotização pode ser fornecedora da sinterização quando esta produz micropelotas crua como matéria prima no lugar do “*sinter feed*” para nucleação a fim de tornar a mistura permeável permitindo a homogeneidade no leito. Um dos principais parâmetros que garante esta homogeneização é o grau de humidade,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

2.4.3 Sinterização

Processo de aglomeração de finos de minério de ferro oriundo na própria mina ou durante o tratamento mecânico, misturado a rejeitos sólidos industriais e combustível, transformando-os através da fusão incipiente da queima em matéria prima de aspecto poroso com maior granulometria denominada sinter para abastecimento em aciaria elétrica.

No processo de sinterização uma gama de 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. O objetivo é criar a matéria prima aglomerada, denominada sinter, com dimensões e forma adequadas esquematizado na Figura 13.

Figura 13 – Esquema simplificado do processo de sinterização.



Fonte: USP, 2013

Dentre as características técnicas do material a ser sinterizado, devem ser observadas análises químicas e físicas no coproduto além das condições técnicas para a execução da operação na determinação da resistência do síter necessária a aplicação, ou seja: a temperatura do processo, velocidade e taxa de resfriamento, aplicação de aglutinante, umidade da mistura, forma e tamanho do síter.

Entre as matérias primas empregadas no processo de sinterização o “*sinter feed*” é a mistura dos diferenciados tipos de minérios de ferro sendo: hematita (Fe_2O_3), limonita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), magnetita (Fe_3O_4) e siderita (FeCO_3). Conforme MACHADO (2006), devem ser observadas as características: 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.

Para as características físicas de forma e tamanho as operações complementares de pré preparação do processamento são de grande valia, observando as principais como a secagem, ajuste da temperatura dos finos, o peneiramento, a pré mistura e as condições de embalagem e estocagem. Na pré mistura pode-se utilizar materiais fundentes para a correção da composição química pois apresentam como principais características a concorrência a remoção de impurezas e permitem a adequada fluidez da escória. Desta forma temos 2 tipos de síter:

Não auto fundentes: São originários de minério de ferro hematítico ou magnético portando SiO_2 e Al_2O_3 , e sem nenhuma base de CaO.MgO .

Auto fundentes: Há o acréscimo de fundentes sendo ainda caracterizados pela relação CaO/SiO_2 denominada basicidade. Quando esta relação é inferior a 1 são descritos ácidos, e maiores que 1 são básicos.

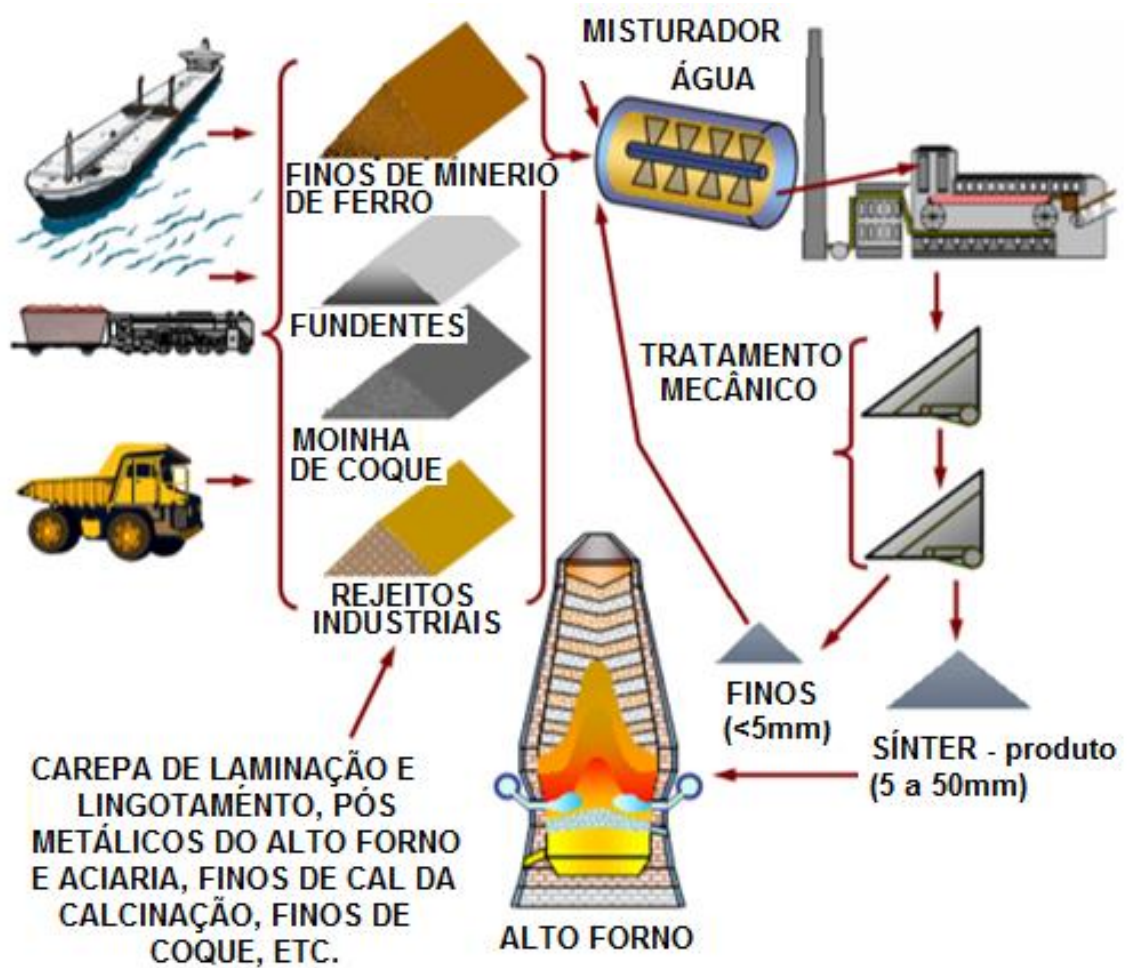
Abaixo segue-se os fundentes aplicados aos processos com granulometria para sinterização encontrada em torno de 0 a 3mm e de 10 a 30mm, conforme MACHADO (2006).

- Calcário (portador de CaO);
- Cal (portador de CaO);
- Dunito (portador de MgO e SiO_2);
- Serpentinó (portador de MgO e SiO_2);
- Dolomita (portador de MgO e SiO_2);
- Quartzo (portador de SiO_2).

O combustível para a sinterização deve possuir alto poder calorífico, sendo aplicado normalmente a moimha de coque. Conforme TAKEHARA (2004), a granulometria apropriada para o coque é de 0,5mm a 3,36mm para que sejam mantidas as velocidades de processo e tempos adequados de queima. Outro ponto a ser considerado referente a granulometria do coque é a formação de poros no sinter, haja visto que esses são formados pelos vazios na mistura a medida que ocorre a queima do combustível.

A Figura 14 exemplifica em esquema resumido do processo de sinterização demonstrando as entradas e saídas do processamento do sinter.

Figura 14 – Fluxograma esquemático do processo de sinterização.



Fonte: CHAVES, 2009

Um dos mais importantes indicadores de processos na siderurgia é o rendimento metálico demonstrando a eficiência do consumo da matéria prima que está sendo empregada. Desta maneira, de forma indireta, o rendimento é uma medição da propriedade de redutibilidade do sinter diferenciada para cada mistura entre os finos de minério de ferro e resíduos sólidos. Quando produzidos apenas com minério de ferro, o sinter apresenta-se com baixa redutibilidade devido à alta quantidade de “*fayalita*”, oriunda da sílica da ganga de minério, sendo necessário o abastecimento direto no forno de cal e quartzo com o inconveniente do aumento do consumo de coque. Assim, a aplicação de fundentes na mistura do sinter é uma melhoria na redução do consumo de coque do alto forno.

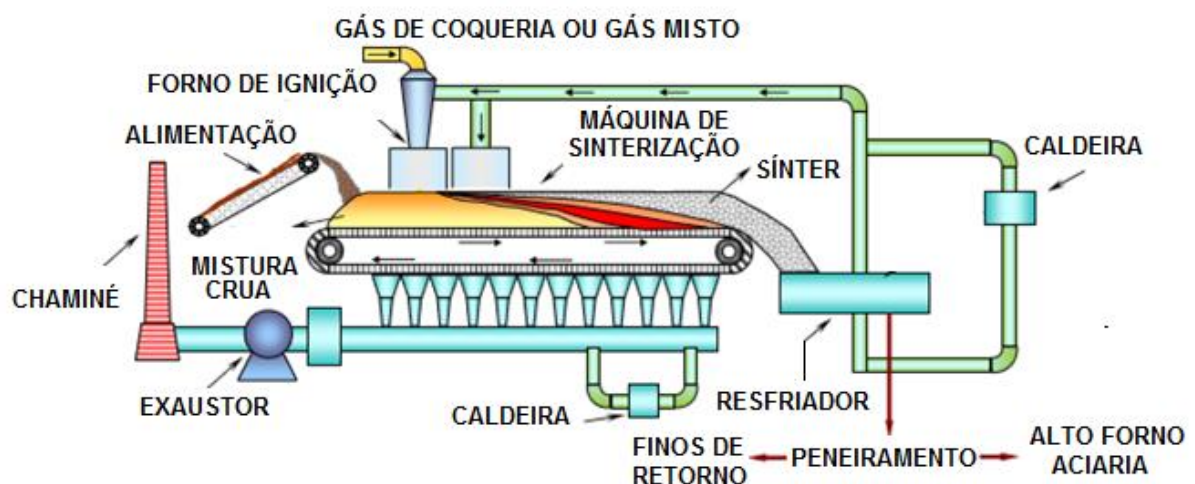
Outro aspecto que pode ser destinado ao consumo do sinter na fabricação de aço é o poder refrigerante, dependente da composição química oferecida durante a sinterização. Desta forma pode permitir o auxílio ao controle de temperatura do metal líquido na aciaria.

O aglutinante tem como característica a capacidade de manter a resistência a compressão e ao impacto após o material ser aglomerado funcionando como uma matriz substancialmente contínua.

Operacionalmente, a temperatura de trabalho no processo de sinterização é determinada experimentalmente com base nas características do coproduto tais como o formato e tamanho das partículas. Desta forma é definido o tempo de residência do material sob atuação do processo de sinterização. Quanto menor a partícula, maior será a quantidade de vazios internos a serem eliminados sendo verificado a maior redução de volume, ou seja, a densidade aparente das partículas cresce se aproximando do valor da densidade real do material. A temperatura de trabalho na sinterização para fusão parcial redutora-oxidante varia de 1250 a 1400°C.

São dois os processos industriais utilizados: o processo intermitente Green Walt em usinas de pequeno e médio porte podendo atingir a capacidade de 1500t/dia, e o processo contínuo Dwight-Lloyd em grandes usinas demonstrado na Figura 15.

Figura 15 – Esquema do sistema de sinterização contínua tipo Dwight-Lloyd.



Ocorrem reações que são ativadas pela temperatura no estado sólido do coproduto durante o processo. Dentre as etapas para a formação do sinter, temos:

- 1) Dosagem de finos de minério de ferro, fundentes, adições, resíduos sólidos, sinter de retorno e combustível sólido.
- 2) Umidificação da mistura para controlar a permeabilidade da camada com a finalidade da obtenção da resistência mecânica.
- 3) Carregamento da mistura em painéis / leito através de esteiras contínuas para o abastecimento do forno.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Vaporização da água da mistura pelo avanço da frente de combustão atingindo o fundo do leito. Ocorre a decomposição dos carbonos hidratados (calcário, dolomita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Fe_2O_3 , NH_2O , etc).

Com a secagem até 300°C ocorre a vaporização da água livre.



A vaporização da água combinada ocorre durante a desidratação de 400 a 500°C .



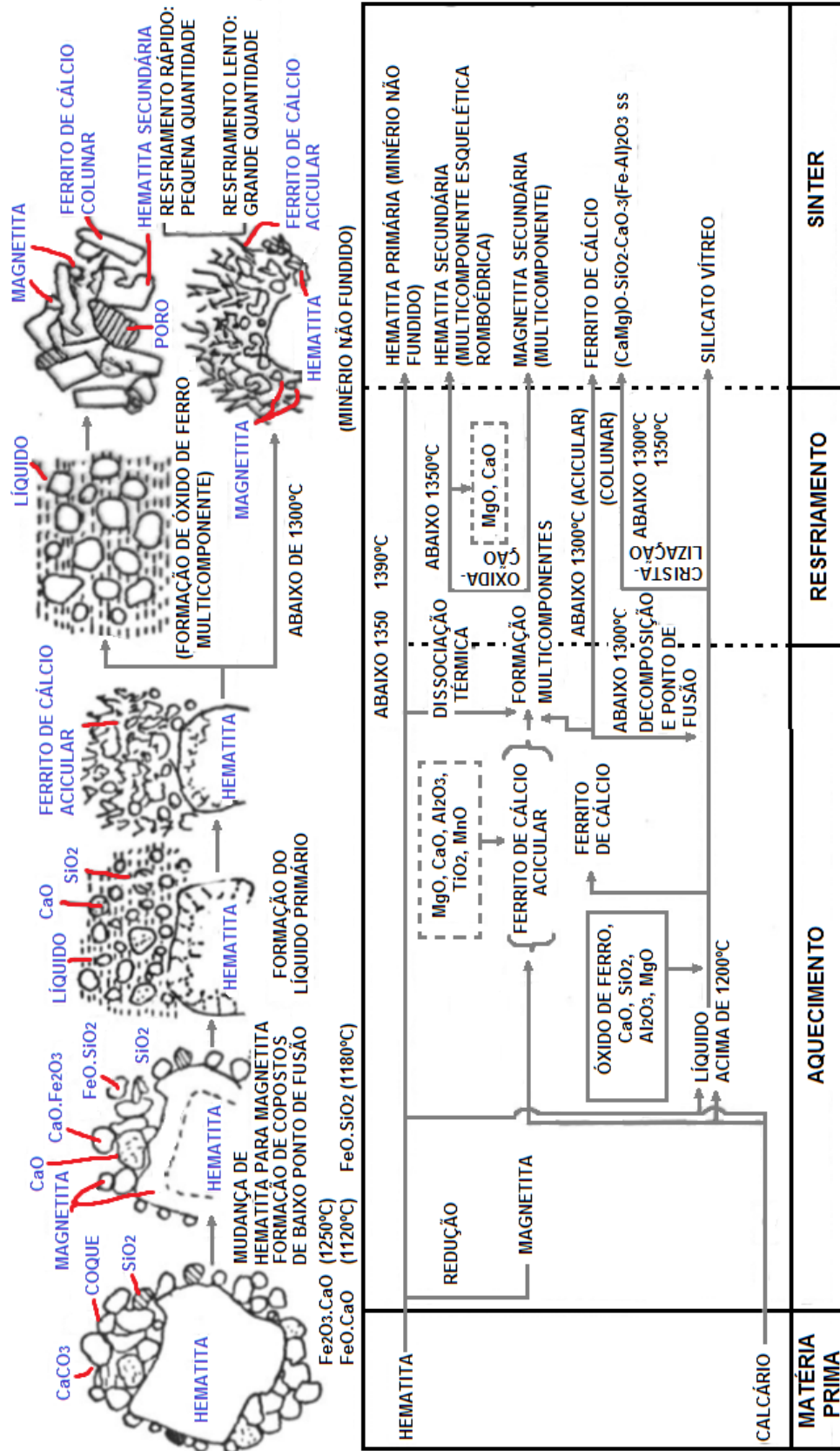
7) Adesão de partículas metálicas pela fusão parcial, caldeamento, das mesmas permanecendo ligadas por uma matriz de escória. São observados o aumento na densidade acompanhado do início de fechamento dos vazios.

É possível a produção de dois tipos de sinteres com diferenciada microtextura de acordo com a temperatura de processamento, os homogêneos e os heterogêneos. LOPES (2012) descreve os tipos de estrutura através do mecanismo de sinterização a diferentes temperaturas aplicadas na obtenção de sinter de minério de ferro, de acordo com a Figura 16.

Dois tipos de estrutura podem ser obtidas dependendo do processo de sinterização, particularmente pela temperatura: estrutura homogênea e heterogênea. A estrutura homogênea possui aparência visual homogênea e é obtida com altas temperaturas de sinterização (>1300°C). Já na estrutura heterogênea, produzida a temperaturas menores, percebe-se significativa quantidade de partículas de sinter feed parcialmente fundidas, sem sofrer reações. [...]

O perfil térmico em um dado ponto no leito de sinterização reflete em uma série de mudanças físicas e químicas, como evaporação, calcinação e fusão parcial. O calor total em qualquer ponto no processo depende da transferência de calor dos gases, consumo de combustível e das reações exotérmicas e/ou endotérmicas. A máxima temperatura alcançada irá determinar o percentual de FeO contido no sinter, o qual deve ser controlado pois influencia diretamente as propriedades do sinter. O efeito da temperatura de sinterização na composição mineral revelou que tanto a ferrita de cálcio quanto a hematita primária decresce com o aumento da temperatura acima de 1250°C. Nesta condição, a morfologia da ferrita de cálcio muda de acicular para colunar (LOPES, 2012 p.17-18)

Figura 16 – Esquema do princípio da sinterização.

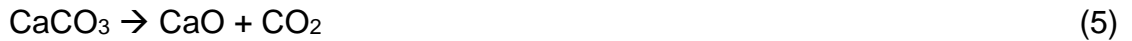


Fonte: USP, 2013

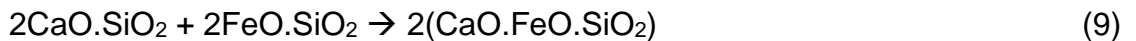
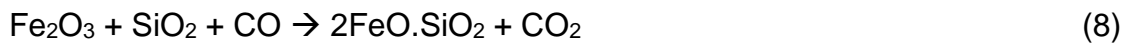
A redução superficial do minério de ferro acontece conforme as reações.



A decomposição de carbonatos entre 750 a 1150°C



Formação de silicatos entre as temperaturas de 600 a 1300°C



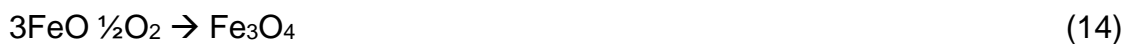
Formação de escória cálcio-ferritas entre 600 a 1300°C



Combustão do coque



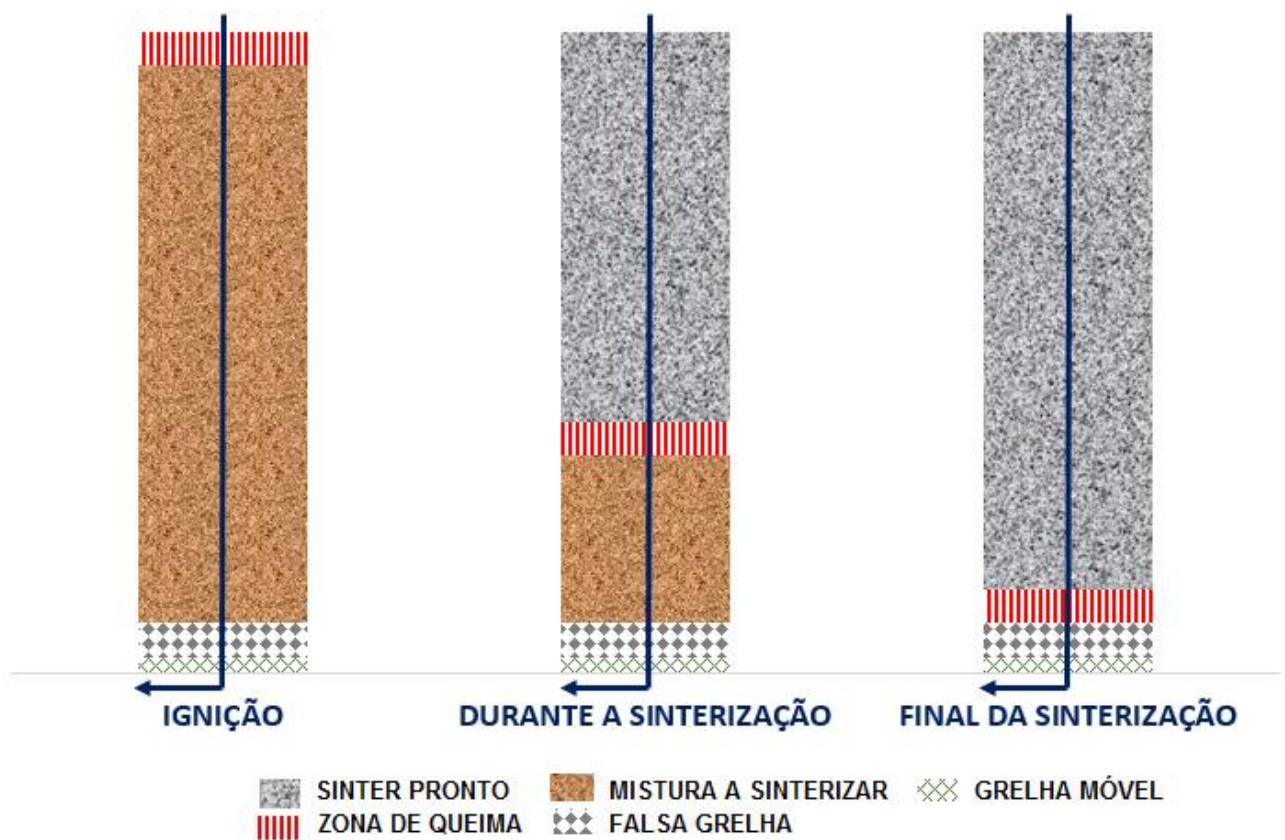
Formação da magnetita



8) 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.

Na figura 17 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.

Figura 17 - Esquema de movimento da frente de combustão



Fonte: MACHADO, 2006

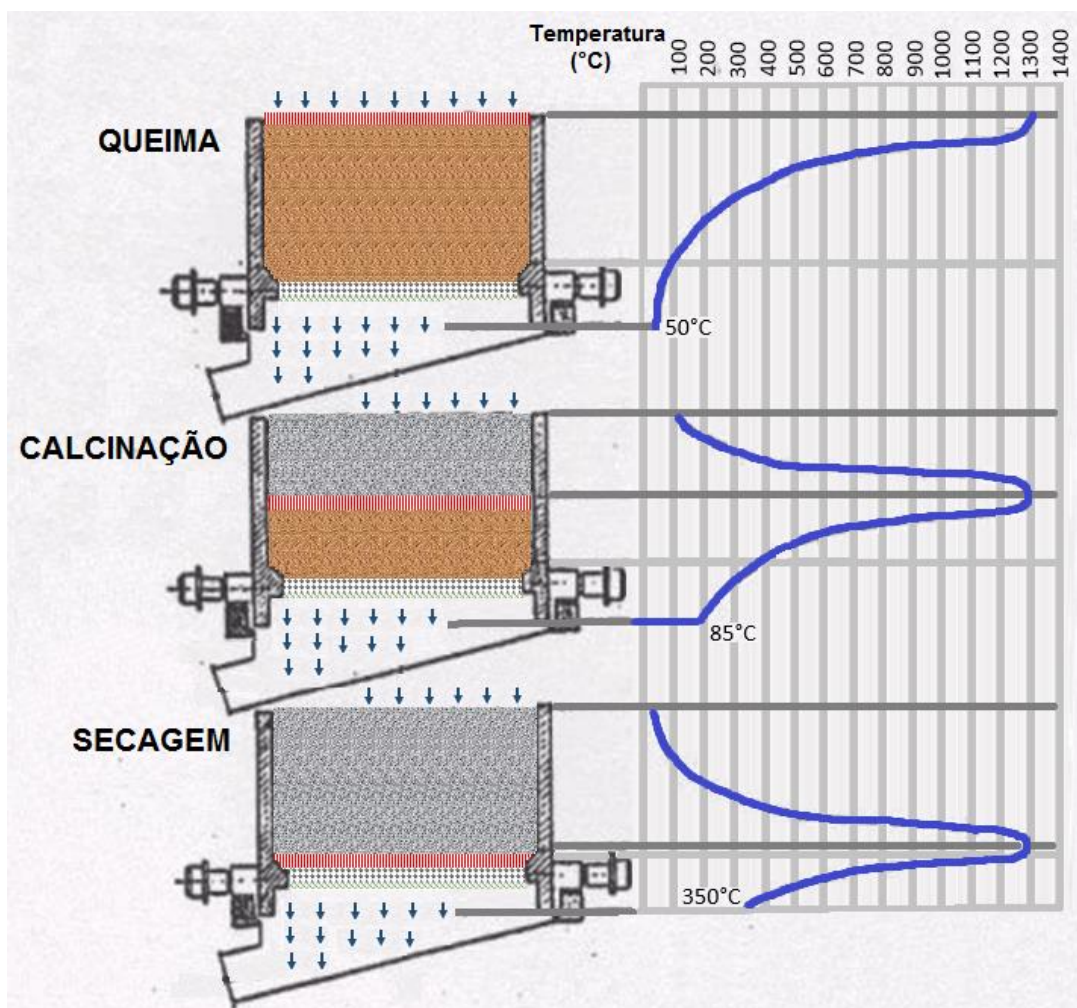
O ar é succionado de cima para baixo através da ação dos exaustores passando através de toda a mistura ocorrendo os fenômenos de transferência de calor e ativação de reações químicas. A continuidade da combustão é dada através das reações junto à frente de combustão até atingir o fundo do leito nas grelhas. O aglomerado de sínter, formado em grandes blocos que posteriormente é britado e peneirado. TAKEHARA (2004) descreve o desenvolvimento destes fenômenos

identificando como parâmetros críticos a vazão de ar além da reatividade e quantidade de combustível.

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 sinterização, 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. (TAKEHARA, 2004, p.89)

As temperaturas no sistema de sinterização a cada etapa são demonstradas sequencialmente na Figura 18, 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 - até 350°C na secagem.

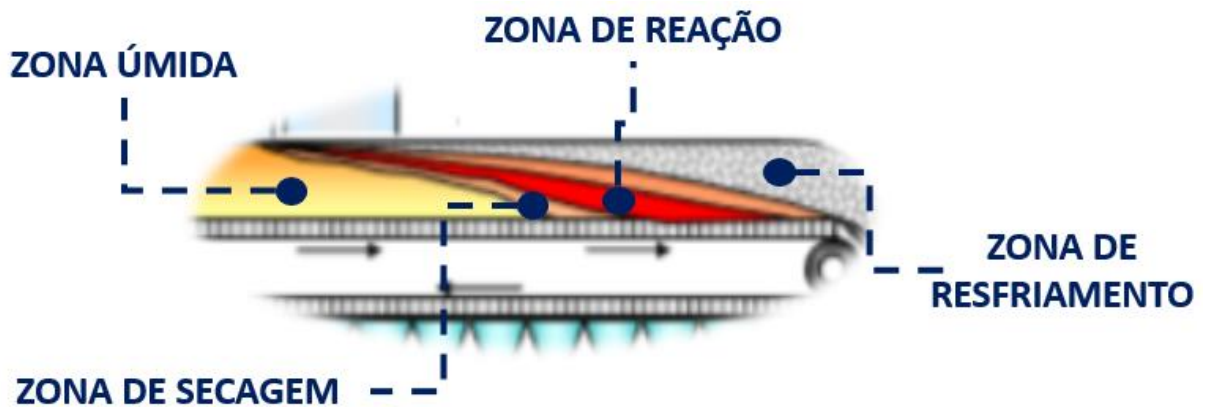
Figura 18 – Esquema de máquina de sinterização intermitente demonstrando avanço e temperatura da frente de combustão.



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 sínter. 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 atinja o final da esteira.

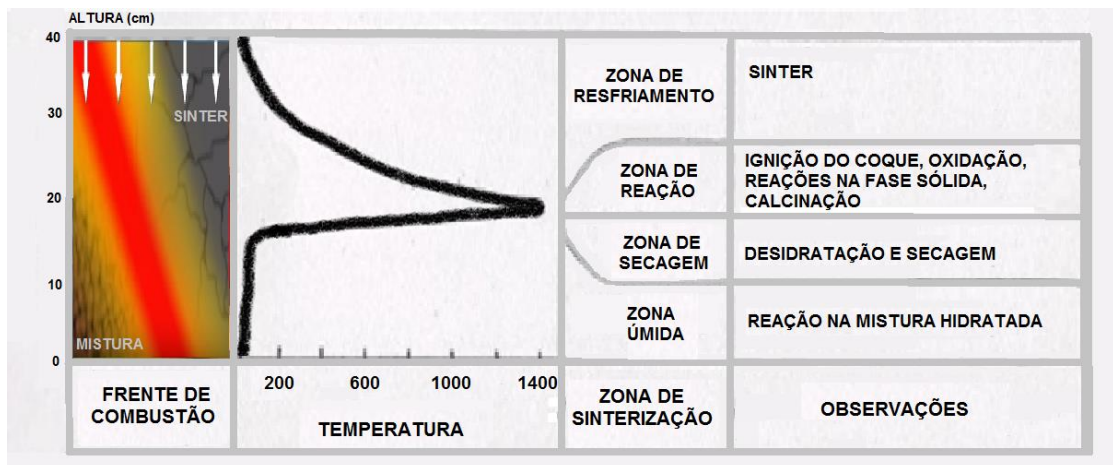
As etapas de sinterização são descritas pelas zonas: zona úmida, zona de secagem, zona de reação e zona de resfriamento representadas no esquema da Figura 19. A temperatura em cada uma das zonas é característica as reações de transformação e são representadas através da Figura 20.

Figura 19 – Corte longitudinal do leito da máquina de sinterização contínua.



Fonte: Adaptado de CHAVES, 2009

Figura 20 – Corte transversal do leito de uma máquina de sinterização contínua.



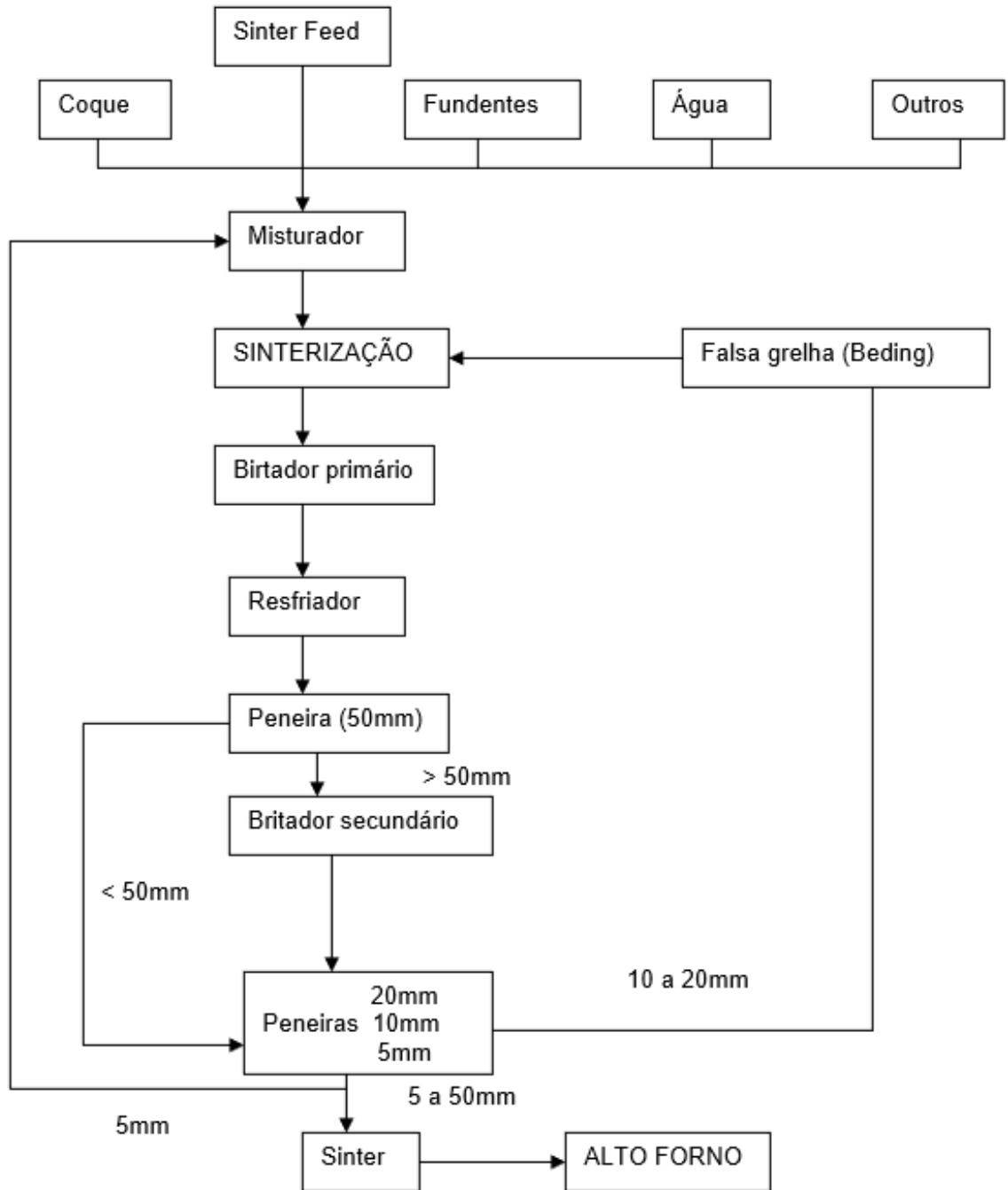
Fonte: Adaptado de MACHADO, 2006

TAKEHARA (2004) explana 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. 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 sínter para a máxima permeabilidade do leito, e assim a maior vazão de ar, devido ao aumento da porosidade.

9) Britagem e peneiramento do bolo para classificação granulométrica de 5 a 50mm do sínter garante a futura permeabilidade da carga com frações homogêneas. No caso de sínter não homogêneo, as partículas maiores o tornam frágil pela ineficiência da sinterização. O sínter de granulometria de 10 a 20mm formam a falsa grelha e os menores que 5mm retornam ao processo de sinterização na preparação da mistura.

Analogamente ao destino aciaria, o fluxo da Figura 21 resume o processo de sinterização demonstrando as atividades primárias e secundárias para garantir a granulometria do sínter.

Figura 21 – Fluxograma de uma sinterização.



Fonte: MACHADO, 2006

2.4.3.1 Qualidade do Sínter

A composição química do aço é dependente da matéria prima empregada, desta forma, do nível de participação do sinter no balanço de carga e o tipo de volume de escória. Quanto a matéria prima empregada, o minério brasileiro apresenta elevado teor de ferro, enxofre, titânio e álcalis com controle químico dos teores de sílica (SiO_2), fósforo (P) e alumina (Al_2O_3). Os inconvenientes destes elementos são que 100% do fósforo, elemento fragilizante do aço, vai para o gusa necessitando 1kg C/t de gusa para retirada de 0,1% de fósforo, tendo que ser adicionado minimamente na aciaria; os álcalis provocam a formação de cascão nos dutos do alto forno e aciaria e o enxofre desclassifica o aço no pós processamento na aciaria também fragilizando o aço. Desta forma, na mistura são encontrados um tipo de minério predominante adicionado em maiores proporções denominado minério base e o minério de adição para correção de composição química conforme a objetivada característica física e química esperada.

Na avaliação da qualidade do produto sinterizado as propriedades físicas obtidas podem ser verificadas na Tabela 3:

Tabela 3 – Propriedades físicas e químicas do sinter.

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

Fonte: Adaptado de CETEM, 2004

Na comprovação destas características, os primeiros ensaios são exploratórios como a granulometria e sua distribuição, teor de umidade, quantidade e propriedades da matriz aglutinante e o peso específico na obtenção de um produto consistente. As principais características determinadas no sínter são:

- Alta resistência mecânica a abrasão e a queda
- Porosidade
- Redutibilidade e granulometria controlada
- Composição química constante e controlada
- Baixo custo de produção (alto rendimento)

O ensaio de resistência à compressão é usado na determinação da resistência do sínter na estocagem devido a esforços compressivos nas pilhas e movimentação no estoque. O produto é submetido a pressão compressivas contínua até a fratura.

A resistência ao impacto simula o abastecimento do produto da altura necessária ao pó de processamento, determinando a resistência a queda. Na determinação podem ser utilizados meios de ensaio de queda livre a partir da altura de 0,3 a 1,5m sobre uma placa de aço com espessura de 10mm. A resistência ao impacto é apurada pelo número de quedas consecutivas que o produto permite sem fragmentar, podendo ser considerado a quantidade de partículas do produto com tamanho inferior a 3,3mm após 20 quedas consecutivas a uma altura de 2,3m ou a perda de peso que deve variar de 5 a 10%.

Para determinar a degradação física sofrida pelo transporte do produto são caracterizadas a perda de peso do produto pela resistência à abrasão 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 conforme (CETEM, 2004). Este tipo de ensaio permite demonstrar a geração de finos e possível redução do rendimento do processo. Outro ensaio utilizado avalia a resistência ao tamboramento podendo variar entre 68% a 72% conforme avaliações de DIAS (2011).

Ainda temos avaliações comumente utilizadas como a determinação da densidade pelo deslocamento do nível de água quando o produto é imerso em água

e a resistência à ação da água para produtos estocados fora de estruturas cobertas pelo ganho de massa do produto após a imersão em recipiente com água determinando a variação do peso ao longo do tempo. Este ensaio impacta diretamente no rendimento do processo visando o abastecimento da maior massa de ferro possível. Como referência, DIAS (2011) apresenta valores de densidade a granel de 1,6 a 1,9 g.cm⁻³ para adequação do tamanho dos silos.

2.4.4 Aplicação de Coprodutos Reaproveitáveis

Os processos produtivos a procura de redução de custos opta por operarem as plantas industriais com maiores níveis em produtividade e redução no consumo de combustíveis. Para isso, no processo de sinterização, um indicador a ser acompanhado é a redutibilidade do sínter. Para que sejam realizados melhores resultados foram observadas as seguintes colocações na produção de ferro primário:

Conforme LAMAS (SANTOS, et al 1994), o uso de lama de aciaria via misturador impacta positivamente na permeabilidade da mistura melhorando o seu poder aglomerante a frio com minério de ferro muito fino sem alteração significativa da composição química. Como desvantagem foram notados maiores desgastes nas válvulas e sprays.

De acordo com ABREU (SANTOS, et al 1994), a escória de aciaria apresenta um teor de ferro considerável para o aproveitamento tendo sua geração de 140kg/t aço produzida. Para o processamento esta deve ser britada e selecionada.

Os finos recolhidos em filtros manga da aciaria elétrica equivalem de 1 a 2% da carga do forno sendo aplicadas como pelotas auto redutoras no processo de redução em fornos de soleira rotativa, aproveitando ao máximo as principais características da pelota (SANTOS; MANTOVANI et al 1996).

A carepa são óxidos de ferro na superfície do aço formadas quando o mesmo é submetido a gradiente térmico nos processos de lingotamento ou laminação. Desprendem das peças produtivas durante o processamento ou movimentação. Para

seu aproveitamento é necessário a aplicação de processos de secagem, peneiramento e briquetagem.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada para a realização dos objetivos propostos neste trabalho foi otimizada e cumprida para avaliar a viabilidade técnica e científica da proposta.

3.1 Materiais

As amostras das matérias primas utilizadas no decorrer deste trabalho foram previamente obtidas a partir da coleta de coprodutos em um complexo siderúrgico integrado com atuação em siderurgia e mineração dominante no portfólio de aços planos.

A geração do volume de resíduos sólidos pode ser verificada através da Tabela 4 notando a diferenciação nas caracterizações de resíduos úmidos e secos para a produção de 4,5 milhões de toneladas anual de aço bruto.

Tabela 4 – Representação do volume gerado de resíduos sólidos na cadeia produtiva de usina integrada.

Resíduo	Volume Úmido (t/mês)	Volume Seco (t/mês)	Fe _T (%)	Na ₂ O + K ₂ O (%)	Zn (%)	S (%)	P ₂ O ₅ (%)
Lama grossa de aciaria	4.721	4.202	79,55	0,30	2,40	-	0,35
Lama fina de aciaria	11.335	8.751	53,95	0,20	2,40	-	0,27
Carepa (laminação tira)	4.117	3.726	71,05	-	-	-	0,01
Carepa (laminação chapa)	822	735	73,88	0,01	-	-	-
Carepa (escarfagem)	6.649	6.051	78,78	-	-	-	0,04
Carepa (lingotamento)	551	517	71,20	1,46	-	0,03	0,06
Pó de cal	3.918	3.910	-	-	-	0,01	-
Pó de dolomito	1.504	1.504	-	-	-	0,04	-
Pó (despoeiramento aciaria)	359	358	57,69	-	-	0,46	0,10
Pó (desp. dessulfuração)	97	97	28,00	3,83	0,15	0,50	0,19
Pó (coletor AF)	3.271	3.140	25,98	0,75	0,05	0,17	0,06
Lama (AF)	3.580	2.764	27,87	0,63	0,19	0,17	0,40
Lama (laminação)	239	194	64,20	-	-	0,14	2,34
Lama (ENA)	648	222	53,75	-	-	1,20	0,88
Pó de decapagem	917	912	61,00	-	-	-	-
Sub total	42.728	37.082	-	-	-	-	-
Total	79.810						

Fonte: Autor, 2015

A composição da mistura ocorreu com a parte dos coprodutos secos, desagregados e sem contaminação de óleo. Dos resíduos sólidos apresentados acima, foram utilizadas como matéria prima:

- Carepa
- Lama Fina de Aciaria
- Moinha de Carvão
- Pó de balão e “Bag House”
- Finos degradados como sinter de retorno
- Pó de cal

A Tabela 5 abaixo demonstra a composição química aplicada a matéria prima utilizada no trabalho realizada por Raio X pelo laboratório Nomos no Rio de Janeiro - RJ. Para a retirada de amostras representativa da matéria prima foram coletadas 10 amostras parciais do carregamento após revirado no piso, removendo duas partes diagonais opostas incluindo o material fino.

Tabela 5 – Composição química da matéria prima utilizada na sinterização

Amostra	FeO (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Na ₂ O (%)	MgO (%)
Carepa	52,28	62,71	2,00	1,21	0,09	0,43
Lama fina de Aciaria	17,28	31,33	9,58	4,76	0,09	0,95
Moinha de coque	3,24	54,84	14,00	3,41	0,10	0,65
Finos de sinter degradados	7,19	34,68	7,77	1,27	0,08	1,35
Pó misto e bag house	10,01	46,50	2,11	1,78	0,13	4,74
Sinter feed	0,00	66,10	1,52	1,45	0,07	0,55

Amostra	P (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)	V ₂ O ₅ (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	Mn (%)
Carepa	0,005	0,12	4,74	0,75	<0,01	0,13	0,57
Lama fina de Aciaria	0,065	0,22	5,76	0,42	<0,01	0,02	0,39
Moinha de coque	0,030	0,45	2,54	0,16	<0,01	0,02	0,13
Finos de sinter degradados	0,061	0,07	13,47	0,42	<0,01	0,03	0,33
Pó misto e bag house	0,299	0,51	22,50	0,36	<0,01	0,04	0,90
Sinter feed	0,059	0,05	0,16	0,93	<0,01	0,04	0,73

Fonte: Autor, 2015

A matéria prima demonstrou-se com alto índice de contaminação visto que a proporção de ferro na lama fina de aciaria apresentou a redução acima de 5% aproximadamente do valor referência apresentado na Tabela 4 enviado pela usina integrada.

3.2 Métodos

Os procedimentos utilizados na geração das informações para definição das características do síter são descritos pelo fluxograma da Figura 22 demonstrando de forma sucinta as etapas envolvidas no trabalho para que os objetivos propostos fossem atendidos.

3.2.1 Equipamento de Sinterização

O tipo de equipamento utilizado para o processo foi a sinterização real contínua da TCS Sinterização com capacidade de produção de 90.000t de síter anual aplicada na Tecnosulfur em Sete Lagoas – MG demonstrado pela Figura 23. O equipamento foi desenvolvido com controle do avanço da velocidade da frente de queima gerada no forno de ignição através da camada da mistura através de esteira. Fisicamente, o corpo de equipamento é caracterizado por:

- Área útil - 13,056m²;
- Largura útil - 1,2m;
- Comprimento - 10,88m.

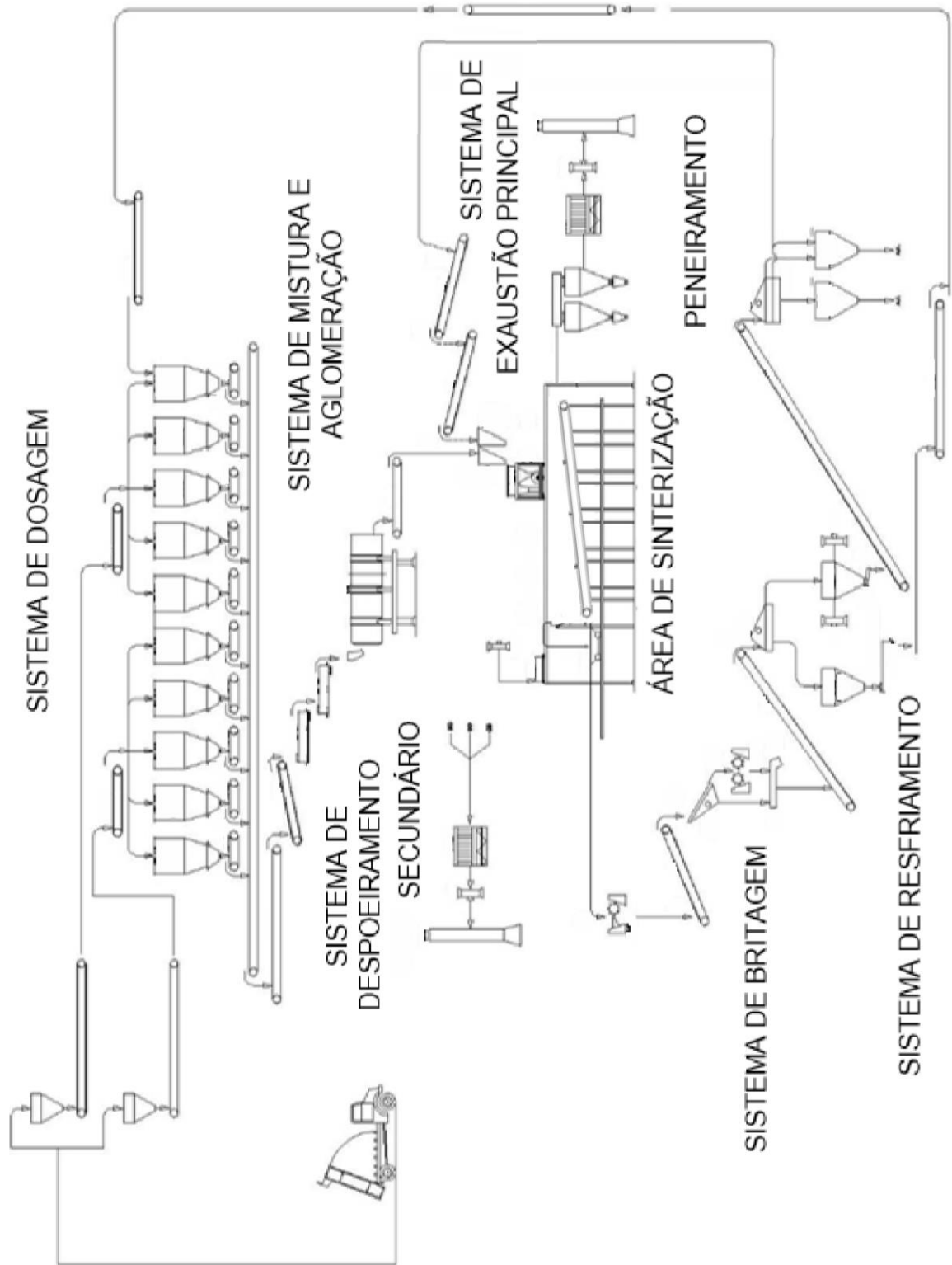
Figura 23 – Sinterização Contínua da Tecnosulfur destinada a sinterização para Aciaria.



Fonte: TCS Sinterização, 2015

Pode ser verificado na representação das etapas de funcionamento do equipamento aplicado aos testes o esquema orientativo para o emprego da matéria prima como recebida da usina integrada até a formação do coproduto sínter na Figura 24.

Figura 24 – Representação do processo de sinterização.



Fonte: TCS Sinterização, 2015

3.2.2 Sistema de Dosagem

3.2.2.1 Peneiramento

O peneiramento foi realizado com a finalidade de remover parte da contaminação e adequar a granulometria dos constituintes da matéria prima, além de prevenir acidentes pessoais e falha no equipamento de sinterização.

A matéria prima demonstrou-se com alto índice de contaminação dentre as 100t de resíduos sólidos, sendo retirados: partes de torrões, pedras, concreto, sucata de aço, madeiras e sacos plásticos.

3.2.2.2 Definição do Leito de Fusão

A determinação do leito de fusão foi realizada em função das quantidades de matéria prima recebida equivalendo a 83,66t após o peneiramento. O objetivo desta etapa é o consumo máximo de lama relativo ao 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. Outro ponto importante foi a definição do percentual de carepa para evitar a emissão de fumos na chaminé, sendo fixado este teor em 3%.

A cal foi introduzida a cada experimento para facilitar a escorificação das impurezas promovendo a formação da matriz de escória pela promoção de maior coesão entre os grãos.

A moinha de coque foi o combustível sólido aplicado ao processamento para geração de calor a partir da ignição e reação exotérmica permitindo o controle da permeabilidade da carga.

Com as proporções de resíduos sólidos definidos conforme a Tabela 6, o abastecimento nos silos foi iniciado e a matéria prima foi carregada através das esteiras transportadoras para o tambor de aglomeração.

Tabela 6 – Proporções da matéria prima utilizando resíduos sólidos nos silos.

TESTE Unidade	1 (%)	2 (%)	3 (%)	4 (%)	5 (%)	Volume (t)
Sínter de retorno (finos de.)	25	25	25	25	30	23,43
Sinter feed	25	25	25	25	29	22,44
Lama de aciaria	20	21	25	28	21	19,17
Moinha de coque	9	9	5	2	0	2,32
Pó de balão + bag house	12	12	12	12	12	9,76
Cal	6	5	5	5	5	4,08
Carepa	3	3	3	3	3	2,46
Total	100	100	100	100	100	83,66

Fonte: Autor, 2015

3.2.3 Sistema de Mistura e Aglomeração

Para que haja a aglomeração dos resíduos sólidos é aplicado ao sistema a adição de 6 a 8% de água em um misturador tipo tambor e iniciado seu giro por 10 minutos. A partir deste momento é obtido uma mistura adequada e homogênea e encaminhada para o leito através de esteiras transportadoras.

3.2.4 Área de Sinterização

A mistura granulada foi lançada na entrada no leito sobre uma grelha permeável a passagem de ar quente dando preferência ao modo de controle manual da temperatura de trabalho parametrizada através da regulação dos queimadores objetivando valores entre o início e final do processamento de 850 a 1000°C.

3.2.5 Determinação do Rendimento do Processo

O rendimento do processo pode ser entendido como o indicador de aproveitamento da matéria prima indicando a quantidade de resíduo sólido necessário para a conversão em sínter na operação de sinterização.

Em operações nas instalações industriais as perdas inerentes ao processamento são identificadas e posteriormente minimizadas e otimizadas

maximizando o aumento de produtividade. No caso da sinterização podemos perceber essas perdas através de alguns fatores como:

- Emissão de pó ou carepa pela chaminé;
- Perda de matéria prima durante o abastecimento e movimentação nas esteiras;
- Formação de cascões, material fundido aderido as barras da grelha;
- Queima de coque;
- Formação de granulometria diferenciada retornando ao processo como síter de retorno.

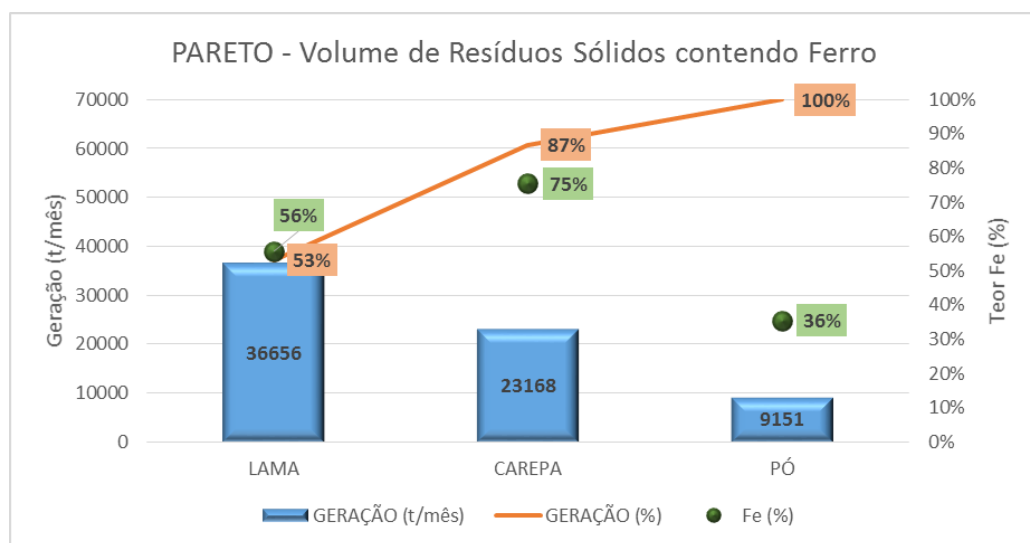
Para a obtenção do valor de rendimento do processo, a matéria prima após o peneiramento de recebimento foi pesada em balança rodoviária, assim como o final do carregamento de síter. O cálculo de rendimento foi realizado através da fórmula:

$$\eta = \frac{\text{peso final de síter}}{\text{peso de matéria prima abastecida nos silos}} \quad (15)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No sistema de dosagem foi necessário a tomada de decisão da relação dos constituintes a serem aplicados e constatado que a lama era a mais representativa em relação aos demais visto o teor de ferro e sua geração mensal conforme Figura 25.

Figura 25 – Representação gráfica de geração mensal de resíduos sólidos da usina integrada e média ponderada do teor de ferro



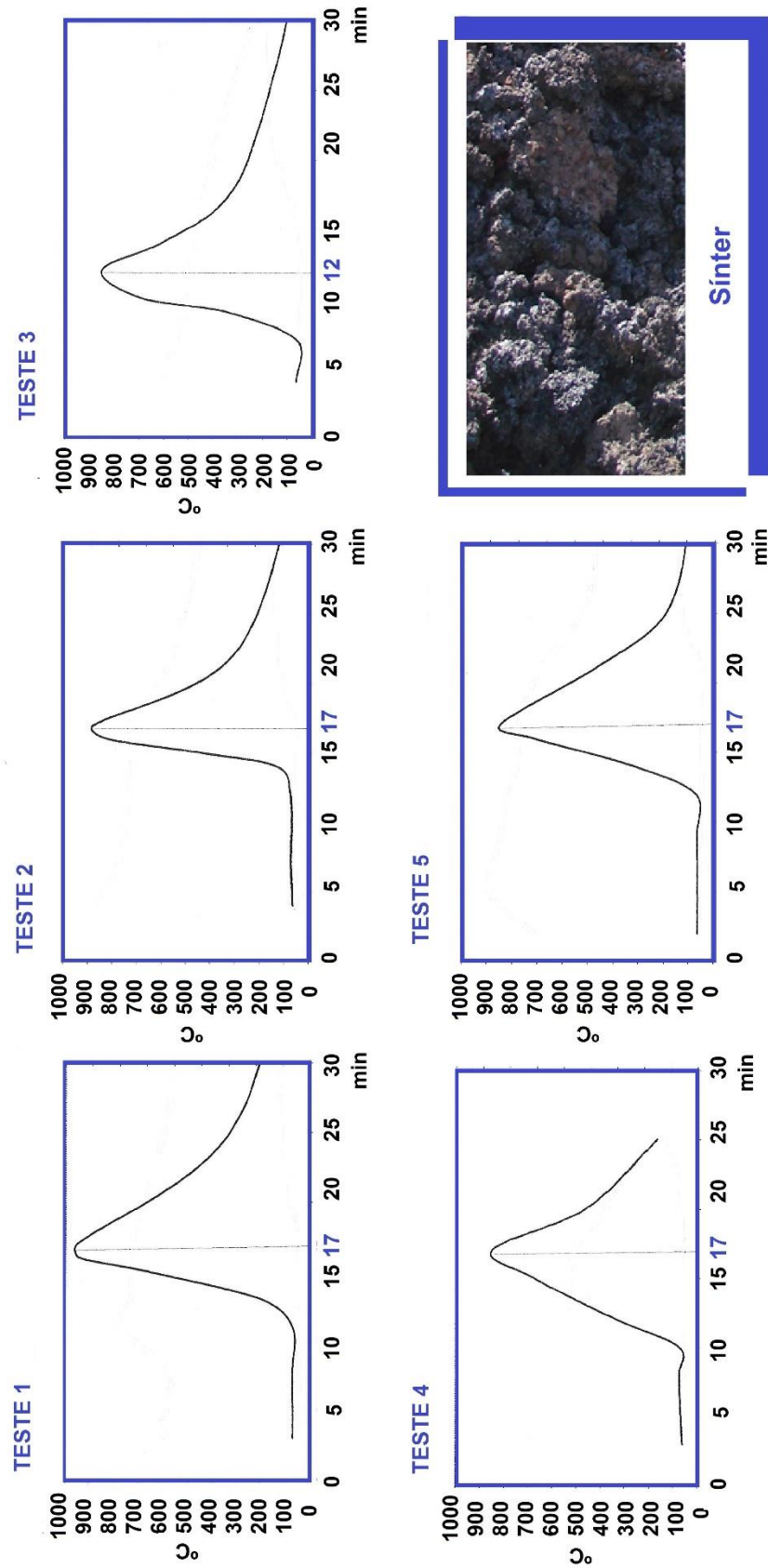
Fonte: Autor, 2015

O teste 1 foi tomado como ponto de referência para comparação com as demais avaliações. Desta forma, para o teste 2 foi necessário a redução do teor de cal devido a aderência de mistura no silo pela baixa velocidade de alimentação do equipamento em 9t/h.

Durante o teste 3 e 4 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, segundo as cartas gráficas da Figura 26. A altura do posicionamento do termopar variou de 150 a 200mm e mistura de 400 a 450mm. 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 processamento, o leito de sinterização apresenta a menor permeabilidade a passagem do ar de sucção com a carga completamente úmida. A permeabilidade da carga vai aumentando com a passagem dos gases quentes ocorrendo a inflexão positiva da curva de temperatura. A máxima temperatura é determinada com a chegada da frente de combustão na altura do termopar com o tempo variando de 12 a 17 minutos. Posteriormente é observada a inclinação negativa da curva indicando o resfriamento do bolo de sinter para a maior permeabilidade da carga devido a formação de poros pela a queima da moinha de carvão.

Figura 26 – Acompanhamento da temperatura da mistura / sínter durante a sinterização.



A análise química resultante do processamento nos testes foi retirada em 5 pontos do montante de sinter realizada por Raio X pelo laboratório Nomos no Rio de Janeiro - RJ, sendo demonstrada na Tabela 7 com foco na quantidade de ferro (Fe_T).

Tabela 7 - Composição química do sinter focada na quantidade de Fe_T .

Amostra	Fe_T (%)	Fe (%)	FeO (%)	SiO_2 (%)	CaO (%)	Basicidade CaO/ SiO_2
Sinter – Teste 1	53,62	46,52	9,10	10,77	12,11	1,12
Sinter – Teste 2	54,48	48,55	7,60	9,81	10,69	1,08
Sinter – Teste 3	54,17	46,60	9,70	11,21	9,89	0,88
Sinter – Teste 4	57,84	48,09	12,50	12,47	7,77	0,62
Sinter – Teste 5	57,00	48,03	11,50	13,45	8,55	0,63

Fonte: Autor, 2015

O percentual de ferro total (Fe_T) foi obtido pelo somatório da proporção de ferro (%Fe) e o percentual da massa molecular do ferro na wustita (FeO). Desta forma, pode-se observar que o resultado de ferro total é atrativo para substituição de parte da sucata em fornos de aciaria elétrica.

Os demais constituintes encontrados no sinter são demonstrados na Tabela 8 podendo notar a ocorrência de alguns óxidos assim como em elementos de liga, também acrescentados ao processo em aciaria elétrica no refino primário e secundário.

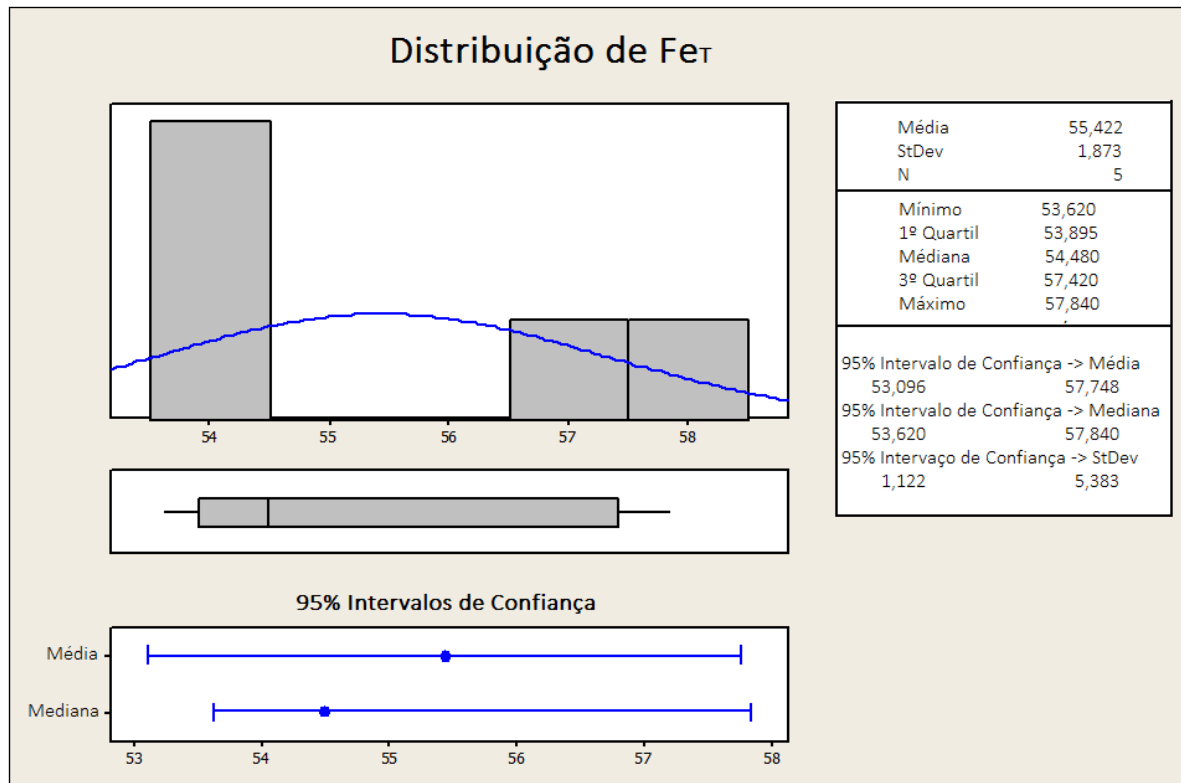
Tabela 8 - Composição química do sinter considerando os demais constituintes.

Amostra	Al_2O_3 (%)	Na_2O (%)	MgO (%)	P (%)	K_2O (%)	TiO_2 (%)	V_2O_5 (%)	Cr_2O_3 (%)	Mn (%)
Sinter 1	5,58	0,08	0,35	0,215	0,01	0,45	0,02	0,10	3,98
Sinter 2	5,18	0,07	0,24	0,146	0,04	0,32	0,02	0,07	4,17
Sinter 3	6,14	0,07	0,34	0,129	<0,01	0,46	0,02	0,07	5,41
Sinter 4	6,01	0,07	0,32	0,105	0,03	0,52	0,03	0,08	4,00
Sinter 5	5,87	0,07	0,15	0,121	<0,01	0,40	0,03	0,11	3,07

Fonte: Autor, 2015

Os dados foram tratados estatisticamente, demonstrando a tendência central e distribuições através do software Minitab 14 exibindo 95% dos intervalos de confiança. Desta forma, a Figura 27 demonstra o histograma com os resultados na forma da distribuição da frequência do percentual de ferro total variando de 54 a 58%.

Figura 27 – Representação gráfica do teor de Fe total nas amostras de sínter.

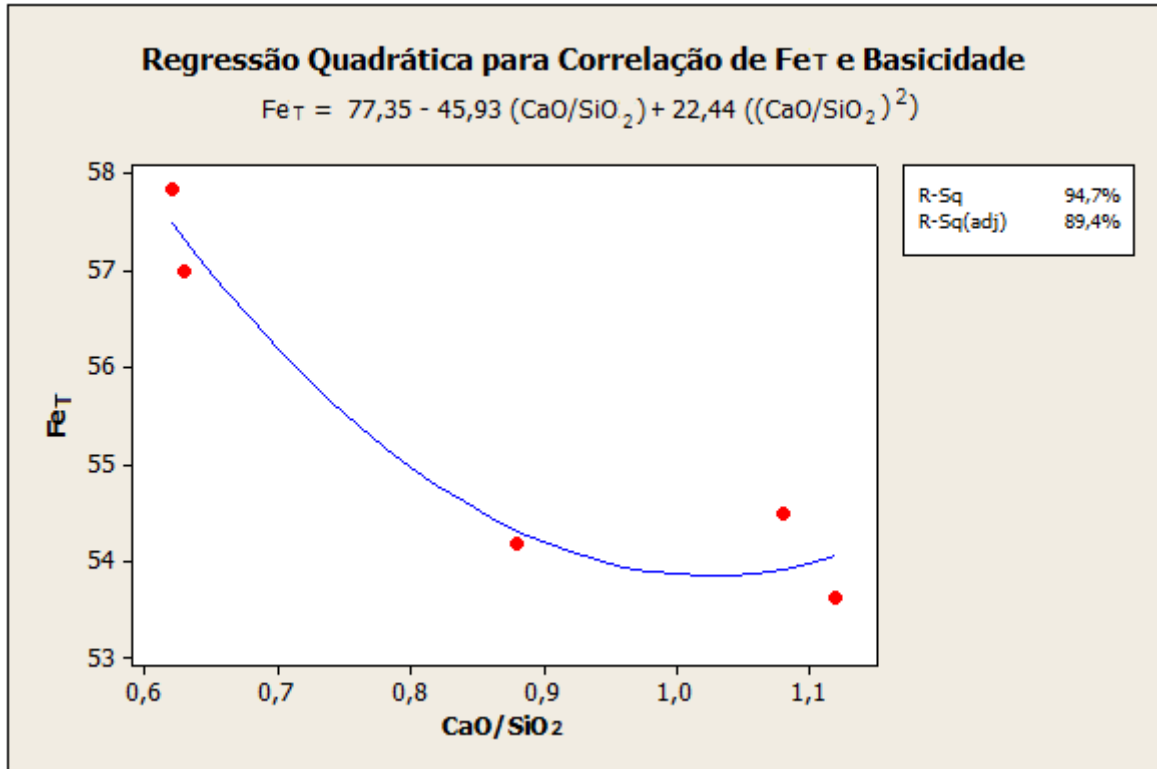


Fonte: Autor, 2015

A influência caracterizada entre a basicidade do sínter e o teor de Fe_T pôde ser avaliada através da análise de regressão quadrática e a relação de chi-quadrado (R-Sq). Foi observado na Figura 28 a curvatura de modelagem na relação demonstrando a probabilidade com o melhor ajuste a distribuição dos pontos experimentais para o valor de chi quadrado ajustado (R-Sq adj) de 0,894 se aproximando consideravelmente a 1, comprovando a forte correlação e significância entre esses fatores no processo, prevendo a redução do teor de ferro com o aumento da basicidade no sínter. A curva para previsão de Fe_T é dada pela equação:

$$Fe_T = 77,35 - (45,93 (CaO/SiO_2)) + (22,44 ((CaO/SiO_2)^2)) \quad (16)$$

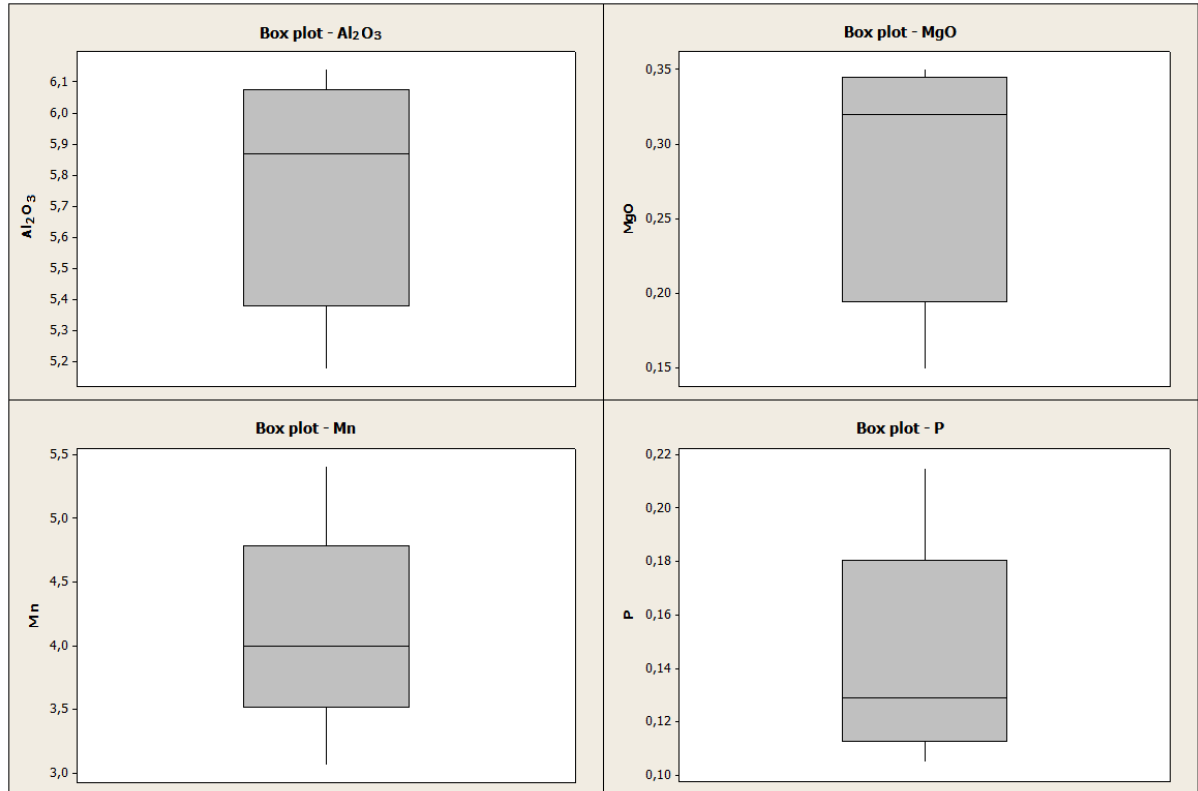
Figura 28 – Avaliação da correlação entre basicidade e teor de Fe_T .



Fonte: Autor, 2015

Dentre os compostos e elementos monitorados no banho na aciaria para controle ou correção de composição química podemos destacar os intervalos da distribuição representados na Figura 29 por meio de “*box plot*”, diagrama de extremos e quartis descrevendo os valores mais prováveis dos dados pela demonstração da mediana e intervalos dos dados nas caixas.

Figura 29 – Intervalo dos compostos e elementos associados a composição química do sínter para aplicação em aciaria. (a) Box Plot para Al_2O_3 ; (b) Box Plot para MgO ; (c) Box Plot para Mn; (d) Box Plot para P.



Fonte: Autor, 2015

Observa-se a participação dos compostos Al_2O_3 e MgO que influenciam a basicidade quaternária para aplicação do produto, podendo ainda contribuir para o controle de basicidade da escória na aciaria elétrica nos parâmetros de fornecimento para usinas siderúrgicas.

O fósforo (P) é um elemento prejudicial à qualidade desclassificando o aço e deve ser controlado pois todo fósforo enviado ao ferro gusa na produção do alto forno requer tratamento na aciaria aumentando o custo de processamento e apenas 10% de sua quantidade é eliminada pela desfosforização.

Mangânês (Mn) são elementos também controlados na aciaria sendo compreendidas por faixas para as especificações do aço, porém são adicionadas

como ligas nas aciarias e podem ser uma fonte de redução de custo já contida no sinter.

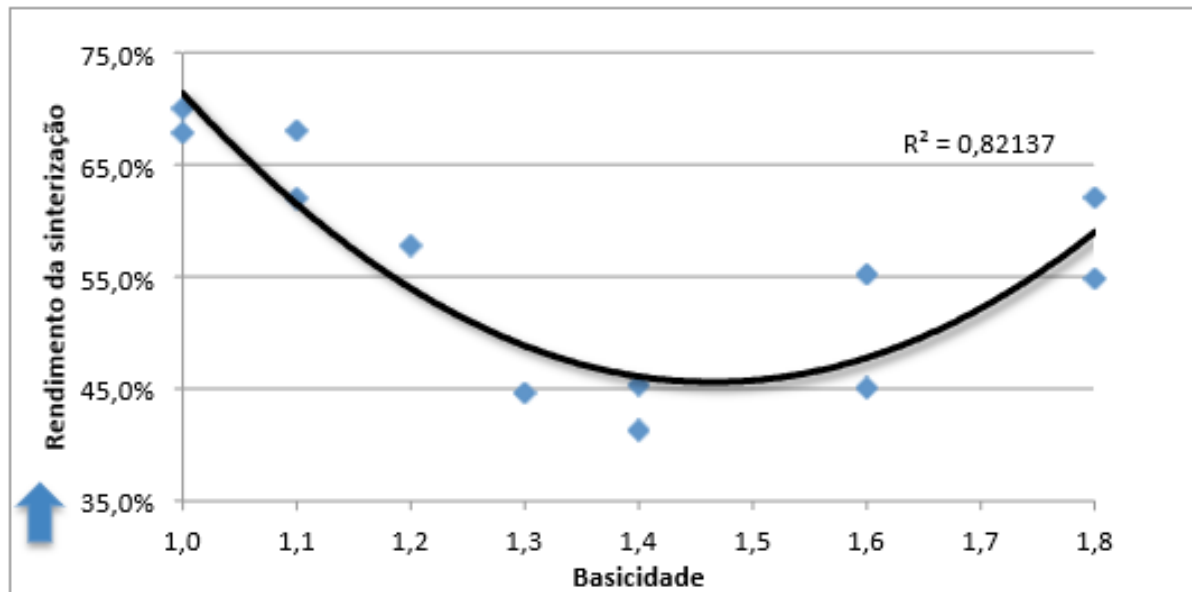
Após a realização dos 5 testes, obteve-se 45t de sinter classificados com granulometria de 15 a 35mm após beneficiamento, apresentando fração fina de 4 a 15mm.

Nos testes iniciais, foi verificado a escorificação da camada superficial da mistura devido ao excesso de temperatura no leito. Por inspeção visual, foi constatado aparência de elevado nível de fusão na superfície do sinter, não sendo perceptível a determinação de excesso de poros que pudesse comprometer a aplicação do mesmo.

Como descrito acima, a quantidade de sinter produzido é correspondente a 45t para 83,66t de matéria prima aplicada. Desta forma o rendimento foi determinado pela equação 15 atingindo o valor de 53,80%.

Em comparação a processos de sinterização de minério de ferro aplicados a altos fornos que possuem o carvão vegetal como redutor, LOPES (2012) determinou o rendimento em função a basicidade do sinter (CaO/SiO_2) para faixa de basicidade de 1,0 a 1,8, descrevendo o resultado em relação a quantidade de carvão utilizada. Os valores obtidos para o rendimento por LOPES (2012) variaram de 43% a 72% conforme a Figura 30 tornando-se aceitável o valor de 53,80% obtido neste desenvolvimento em acordo com a inferior basicidade e a formação de cascões devido à elevação da temperatura no experimento.

Figura 30 – Rendimento da sinterização em função da basicidade.



Fonte: LOPES, 2012

Para a visualização das projeções do potencial de retorno do investimento foi adotado que uma instalação com tecnologia TCS Sinterização trabalharia com capacidade produtiva de 100.000 toneladas anuais para o investimento de R\$20.000.000,00. Projeta-se a receita operacional líquida anual de R\$27.000.000,00 para o custo de produção de R\$13.000.000,00 vislumbrando o “pay back” de 3 anos. Na usina siderúrgica os ganhos são traçados considerando anualmente: o resgate do custo com a destinação externa a fábrica dos rejeitos equivalendo a R\$12.000.000,00; a substituição de parte da carga metálica de sucata por matéria prima interna a usina, correspondendo a R\$42.000.000,00; além de ganhos ambientais com a gestão de resíduos. Desta forma, para a siderúrgica além das vantagens ambientais e logísticas seria estruturada uma nova margem de lucratividade relativa a diferença entre a economia de R\$12.000.000,00 mais R\$42.000.000,00 menos os custos de aquisição do sinter contendo rejeitos da ordem de R\$32.000.000,00. O resultado total obtido na operação anual seria da ordem de R\$22.000.000,00 contribuindo para a sustentabilidade das operações da siderúrgica.

5. CONCLUSÕES

A rota da sinterização apresenta-se possível e atrativa em modelo ecoeficiente com viabilidade de consumo superior de resíduos sólidos aos aplicados neste trabalho.

Os resultados obtidos revelaram que o sinter apresentou teor de ferro total de 55% com granulometria variando de 15 a 35mm e rendimento de 53,8%. Em decorrência, pode-se observar que o resultado de ferro total é atrativo para substituição de parte da carga metálica de sucata em fornos de aciaria elétrica para rota tecnológica aplicada a usinas semi integradas. Uma das maiores dificuldades na aplicação da sucata é seu grau de contaminação em que alguns elementos não são eliminados no refino primário ou secundário podendo comprometer toda a corrida. A aplicação de sinter é viabilizada vislumbrando um maior controle de processo pelo conhecimento da matéria prima empregada em silos na aciaria além da contribuição no controle de temperatura do banho como refrigerante.

Fica evidenciado a necessidade do conhecimento prévio da composição química dos constituintes do leito de fusão como ferro total e óxido de ferro sendo possível a determinação de contaminação para parametrizar o processo de sinterização de forma mais eficiente. Ainda vale ressaltar a correlação de ferro total com o teor de basicidade do sinter, em que para objetivar maiores tores de ferro total deve ser reduzida a relação de basicidade.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se que trabalhos futuros verifiquem:

- (i) Caracterização quantitativa de sínter a partir de resíduos sólidos siderúrgicos por microscopia.
- (ii) Determinação da carga metálica ótima em aciaria utilizando sínter a partir de resíduos sólidos siderúrgicos como substituto a sucata metálica.
- (iii) Influência da aplicação de sínter a partir de resíduos sólidos siderúrgicos como refrigerante no controle de temperatura do aço em aciaria.

7. REFERÊNCIAS

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004 – Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001 – Sistema de gestão ambiental - Requisitos com orientações para uso**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BARBOSA, Marina Renó. **Caracterização geoambiental da escória de aciaria de cinco estados brasileiros**. Ouro Preto: Dissertação de Mestrado em Geotecnia a Universidade Federal de Ouro Preto, 2013. Disponível em: <http://www.nugeo.com.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/dissertacao-caracterizacaogeoambientalescorias.pdf>. Acessado em: 15 mar. 2016

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/Granulacao%20na%20Siderurgia%20-%20Min%20rio%20de%20Ferro-921.pdf>>. Acesso em: 17 jun. 2015

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.

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.

Disponível

em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/18971/000733701.pdf?>>.

Acesso em: 15 mar. 2016

CANTARINO, Marcos Vinícius. **Estudo da remoção de zinco e de alcális contidos em lamas 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

CARVALHO, Eduardo Augusto de; BRINCK, Valter. **Briquetagem**. Comunicação técnica elaborada para o livro tratamento de minérios: Capítulo 15 – pg 613 a 636. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. Ministério da Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/762>>. Acessado em: 18 mar. 2016.

CARVALHO, Eduardo Augusto de; BRINCK, Valter; CAMPOS, Antonio Rodrigues de; FONSECA, Vinícius Oliveira. **Aglomerção**. Comunicação técnica elaborada para o livro tratamento de minérios: Capítulo 16 – pg 683 a 750. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. Ministério da Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro, 2010. Disponível

em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/handle/cetem/712/CCL00220010.pdf>>.

Acessado em: 18 mar. 2016.

CASA CIVIL - **Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), mediante Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 14 mar. 2015.

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 / 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>. 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>. 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

BARTHELMY, David. **Mineralogy Database.** 2014. Disponível em: <<http://www.webmineral.com/>>. Acesso em: 15 mar. 2016

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 minperio 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.

FILHO, Arnaldo Costa Barra. **CST - Sinterização.** Serra, 2013. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=vSZTPnHjiR8>>. Acesso em: 27 set. 2015

GEGENHEIMER, Rogerio. **CST - Alto Forno.** Serra, 2007. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=UtMy4ZY3jgc>>. Acesso em: 27 set. 2015

GERDAU. **Assuntos Institucionais e Comunicação Corporativa.** São Paulo, 2011. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=vrgQaq3Y0IU>>. Acesso em: 27 set. 2015

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>. Acesso em: 25 set. 2014

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 AÇO BRASIL. **Aço e sustentabilidade. 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 AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2014.** Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/relatorio.asp>>. Acesso em: 06 abr. 2015

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Gestão para a sustentabilidade na mineração: 20 anos de história.** Brasil: IBRAM, 2012. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002130.pdf>>. Acessado em: 15 mar. 2016

KRALYEVICH PRODUCTIONS INC (KPI). **National Geographic Production.** United States, 2006. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=z5VpDIGJDto>>. Acesso em: 27 set. 2015

LOBATO, Natália Cristina Candian. **Gerenciamento de resíduos sólidos da indústria siderúrgica.** Belo Horizonte: Dissertação de mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas a Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. Disponível em: <<http://www.ppgem.eng.ufmg.br/defesas/2182M.PDF>>. Acesso em: 17 jun. 2015

LOPES, Marcelino Vieira. **Caracterização de sinter 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

MACHADO, Marcelo Lucas Pereira. **Apostila de elaboração, refino e lingotamento do aço.** Vitória: Curso de Engenharia do Centro Federal de Educação Tecnológica do Estado do Espírito Santo - CEFETES, 2007. Disponível em: <ftp://200.137.71.3/cursos/EngenhariaMetalurgica/Marcelolucas/Disciplinas/Aciaria/Elaboracao_Refino_Lingotamento_do_Aco.pdf>. Acessado em: 15 mar. 2016

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>. Acesso em: 28 mar. 2015

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/Arquivos/conhecimento/bnset/set3906.pdf>. Acessado em: 15 mar. 2016

MOURÃO, José Murilo. **Estudo prospectivo do setor siderúrgico - NT minério de ferro e pelotas – situação atual e tendências 2025**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008. Disponível em:

<<http://www.cgee.org.br/atividades/redirect.php?idProduto=4841>>. Acessado em: 15 mar. 2016

QUARESMA, Luiz Felipe. **Minério de ferro - produto 9 - Relatório técnico 18: Perfil da mineração de ferro**. Brasília: Ministério de Minas e Energia – MME, 2009. Disponível

em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P09_RT18_Perfil_da_Mineração_de_Ferro.pdf/e9ef3b57-cdbd-4166-b39d-f0f26f28e3ca>. Acessado em: 15 mar. 2016

PAUL WURTH CORPORATE. **Paul Wurth Corporate Movie**. Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=1UVPiLMaZJw>>. Acesso em: 27 set. 2015

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.btdt.ufscar.br/htdocs/tedeSimplificado//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=2811>. Acesso em: 17 jun. 2015

SAMPAIO, João Alves; COSTA, Lauro Santos N.; ANDRADE, Marcelo Correa de. **Ensaio contínuo de briquetagem em bancada e piloto**. Comunicação técnica elaborada para o livro tratamento de minérios: práticas laborais parte V – Aglomeração. Capítulo 22 – pg 379. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. Ministério da Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1067>>. Acesso em: 18 mar. 2016

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-A4AE-F1AB6CE41AE0%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>. 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

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>. Acesso em: 17 jun. 2015

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_aco.php>. Acesso em: 27 set. 2015

SINGH, Maneesh. **Studies on the cement-bonded briquettes of iron and steel plant by-products as burden material for blast furnaces**. Sweden: Doctoral thesis in Division of process metallurgy Luleå University of Technology, 2003.

STRUGARIU, Maria Laura; SERBAN, Sorina; ARDELEAN, Erika; SOCALICI, Ana; HEPUT, Teodor. **Research on the Recovery of Oil in the Iron and Steel Mill Scale**. Romania: Recent advances in manufacturing engineering, 4th International conference on manufacturing engineering, quality and production systems, p 204 - 207, 2011. Disponível em: <<http://www.wseas.us/books/2011/Barcelona/MEQAPS.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2014

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>. Acessado em: 15 mar. 2016

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

TELLES, Victor Bridi. **Reciclagem da poeira de aciaria elétrica na sinterização de minério de ferro visando a eliminação de zinco**. São Paulo: Dissertação de mestrado em Engenharia a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, 2010. Disponível

em: <http://www.teses.usp.br/index.php?option=com_jumi&fileid=11&Itemid=76&lang=pt-br&filtro=telles,%20victor%20bridi>. Acesso em: 21 mai. 2015

TELLES, Victor Bridi; ESPINOSA, Denise Croce 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

TELLES, Victor Bridi; ESPINOSA, Denise Croce Romano; TENÓRIO, Jorge Alberto Soares; JUNCA, E.; RODRIGUES, G.F. **Utilização da poeira de aciaria elétrica na sinterização de minério de ferro: influência da granulometria**. Campos e Jordão: 19º Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais - CBECiMat, 2010.

USP, 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>. Acesso em: 05 nov. 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

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