

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

MARIANNE VIEIRA LEMOS

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE SÍNTER DE FINOS DE
FERRO DE MATRIZ LATERÍTICA COM ADIÇÃO DE PELLET FEED**

**VOLTA REDONDA
2018**

**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 SÍNER DE FINOS DE
FERRO DE MATRIZ LATERÍTICA COM ADIÇÃO DE PELLET FEED**

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:
Marianne Vieira Lemos

Orientador:
Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

**VOLTA REDONDA
2018**

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

L555d Lemos, Marianne Vieira.

Desenvolvimento e caracterização de sinter de finos e ferro de matriz laterítica com adição de Pellet Feed. / Marianne Vieira Lemos. - Volta Redonda: UniFOA, 2018.

110 p. : II

Orientador(a): Alexandre Fernandes Habibe

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2018

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

CDD – 620.1

FOLHA DE APROVAÇÃO

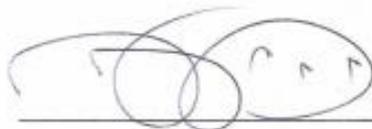
Aluna: Marianne Vieira Lemos

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE SÍNTER DE FINOS DE
MATRIZ LATERÍTICA COM ADIÇÃO DE PELLET FEED**

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Banca Examinadora



Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe



Prof. Dr. Luiz de Araujo Bicalho



Prof. Dr. Diego Orlando

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que me deu forças para finalizar esse trabalho.

A minha família pelo apoio e dedicação.

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

Ao coordenador do curso o Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago, as secretárias Ana Maria e Isabella pela atenção e disposição em ajudar.

RESUMO

Este trabalho trata da elaboração de um sinter de minério de ferro considerando-se uma rota alternativa baseada na utilização de matérias primas classificadas como menos nobres e resíduos siderúrgicos, disponíveis em usinas de fabricação de ferro gusa com Altos Fornos a carvão vegetal no interior do estado de Minas Gerais. A rota alternativa em questão se estrutura com a mistura de minério de ferro de matriz laterítica, pellet feed disponível em pátio de usina siderúrgica e os resíduos siderúrgicos tradicionais, tais como: finos de carvão, finos de calcário, pó de coletor e finos degradados de retorno da própria sinterização. O conjunto de objetivos do trabalho repousa sobre o estabelecimento de misturas ponderadas destes materiais de forma a balancear um sinter com características mecânicas adequadas, que atendam às normas e propiciem a síntese de um sinter qualitativamente favorável a redução em Alto Forno a carvão vegetal. Foram sinterizadas cinco misturas ponderadas, avaliadas quanto a resistência a queda (Shatter Test) e tamboreamento (Tumbler Test), e avaliados também a basicidade binária dos sínteres produzidos para projeção da possibilidade da utilização destes nos Altos Fornos. Baseando-se no interesse da sustentabilidade, mantendo a qualidade e o custo para apoiar a utilização de matérias primas menos nobres e resíduos, criando assim como coproduto um sinter alternativo para aplicação em Alto Forno na produção do ferro gusa.

Palavras chave: resíduos siderúrgicos; resistência mecânica; sinter

ABSTRACT

This work deals with the elaboration of an iron ore sinter considering an alternative route based on the use of raw materials classified as less noble and steel residues, available in pig iron manufacturing plants with charcoal High Furnaces in the interior of the state of Minas Gerais. The alternative route in question is structured with the mixture of laterite matrix iron ore, pellet feed available in the yard of the steel mill and the traditional iron and steel residues, such as: coal fines, limestone fines, collector powder and degraded fines return of sintering itself. The set of objectives of the work rests on the establishment of weighted mixtures of these materials in order to balance a sinter with adequate mechanical characteristics that meet the norms and propitiate the synthesis of a sinter qualitatively favorable to the reduction in Blast Furnace to charcoal. Five sinter mixtures were tested, considering Shatter Test and Tumbler Test, and later on evaluated the binary basicity of the sinters produced for the projection of the possibility of their use in the Blast Furnaces. Based on the interest of sustainability, maintaining the quality and cost to support the use of less noble raw materials and waste, thus creating as an alternative product for blast furnace application in the production of pig iron.

Keywords: steel residues; mechanical resistance; sinter

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. Objetivo.....	15
1.2. Justificativa	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1. Cenário Relativo a Mineração	16
2.2. A Siderurgia	19
2.2.1. Principais Insumos básicos para Siderurgia	20
2.2.2. Redução e extração do Ferro.....	21
2.2.3. Transformação do ferro gusa em aço.....	22
2.2.4. O impacto da Geração de Resíduos	23
2.2.5. Fontes e tipos de Resíduos Sólidos Siderúrgicos	24
2.2.6. Resíduos Gerados na Siderurgia	27
2.2.7. Tipos de resíduos sólidos siderúrgicos.....	29
2.3. Reutilização e Coprocessamento de Resíduos Sólidos	31
2.4. Destinação dos resíduos siderúrgicos.....	31
2.4.1. Processos de aglomeração de sólidos particulados	33
2.4.2. Processo por Briquetagem.....	33
2.4.3. Processo via Pelotização	35
2.4.6. Processo via Sinterização.....	39
2.4.6.1. Definição e conceitos.....	39
2.4.6.2. Fundentes para a Sinterização	50
2.4.6.3. Combustíveis para Sinterização	52
2.4.6.4. Qualidade do Sínter.....	53
2.4.6.5. Resistência mecânica.....	54
2.4.6.6. Tumbler Test	55
2.4.6.7. Shatter test	56
2.4.6.8. Características básicas de Minério de Ferro utilizado em Sinterização.....	57
2.4.6.9. Conjunto das Características Químicas.....	58
2.4.6.10. Características Físicas.....	59
2.4.6.11. Resistência a Frio do Sínter.....	61
2.5 Laterita.....	63
3. MATERIAIS E MÉTODOS	66
3.1. Materiais	67
3.2. Métodos.....	69
3.2.1 Dosagem das Misturas.....	69
3.2.1.1 Peneiramento	69
3.2.1.2 Definição do Leito de Fusão	69
3.2.1.3 Planta Piloto de Sinterização	69

322	Caracterização Mecânica do Sínter Produzido.....	73
3.2.2.1.	Shatter Test.....	73
3.2.2.2.	Tumbler Test	78
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	83
5.	CONCLUSÕES.....	103
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	105
7.	REFERÊNCIAS	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma de produção do aço e sua geração de resíduos.	23
Figura 2 - Obtenção do aço - diagrama de blocos	25
Figura 3 - Fluxograma da geração de resíduos em um alto forno a carvão vegetal..	27
Figura 4 - Escória produzida em aciaria elétrica	29
Figura 5 - Compressão em prensa de rolos.	33
Figura 6 – Disco de Pelotamento.	34
Figura 7 – Diagrama do sistema de pelotização.	35
Figura 8 – Mecanismo de formação da pelota	36
Figura 9 – Esquema representativo do processo de Sinterização	37
Figura 10 – Esquema simplificado do processo de sinterização	38
Figura11 – Fluxograma esquemático do processo de sinterização.....	40
Figura 12 – Esquema básico representando o sistema de sinterização contínua do tipo Dwight–Lloyd.....	42
Figura 13 – Esquema do princípio da sinterização.....	43
Figura 14 – Esquema de progressão da frente de combustão.....	44
Figura 15 – Esquema de máquina de sinterização intermitente demonstrando avanço e temperatura da frente de combustão.	45
Figura 16 – Corte longitudinal do leito da máquina de sinterização contínua	46
Figura 17 – Corte transversal do leito de uma máquina de sinterização contínua	46
Figura 18 – Fluxograma de uma sinterização.	48
Figura 19 – Esquema representativo do Tumbler Test.....	53
Figura 20 – Esquema representativo do Shater Test	55
Figura 21– Distribuição granulométrica ideal para mistura de minério	58
Figura 22 – Fotomicrografia de micropelotas em mistura a sinterizar	59
Figura 23 - Influência da basicidade na resistência do sínter.....	60
Figura 24 - Influência da basicidade na resistência a frio do sínter.....	61
Figura 25 – Solo em Processo de Laterização.....	62
Figura 26 – Laterita	63
Figura 27 – Coloração do solo laterítico	63
Figura 28 – Fluxograma Geral da Metodologia	64
Figura 29 – Vista geral da planta piloto	69
Figura 30 - Planta piloto e exaustor.....	69
Figura 31 – Misturador e micropelotizador.....	70

Figura 32 – Micropelotizador vista frontal.....	71
Figura 33 – Painel de Sinterização	71
Figura 34 – Painel e Sistema de basculamento	72
Figura 35 – Características do aparelho utilizado no shatter test.....	73
Figura 36 – Aparelho utilizado no ensaio de queda.....	74
Figura 37 – Esquema para a realização do shatter test.....	75
Figura 38 – Características do aparelho utilizado no tumber test.....	78
Figura 39 – Aparelho utilizado no ensaio do tumbler	79
Figura 40 – Esquema de realização do tumbler test.....	80
Figura 41 – Amostra de Sínter obtida após processamento da Mistura 1.....	83
Figura 42 – Amostra de Sínter obtida após processamento da Mistura 2.....	84
Figura 43– Amostra de Sínter obtida após processamento da Mistura 3.....	85
Figura 44 – Amostra de Sínter obtida após processamento da Mistura 4.....	86
Figura 45 – Amostra de Sínter obtida após processamento da Mistura 5.....	87
Figura 46 – Gráfico Basicidade x Ferro Total.....	89
Figura 47 – Gráfico Shatter Test Mistura de Sínter 1.....	90
Figura 48 – Gráfico Shatter Test Mistura de Sínter 2.....	91
Figura 49 – Gráfico Shatter Test Mistura de Sínter 3	92
Figura 50 – Gráfico Shatter Test Mistura de Sínter 4.....	93
Figura 51 – Gráfico Shatter Test Mistura de Sínter 5.....	94
Figura 52 – Gráfico Basicidade x Índice de Queda	94
Figura 53 – Gráfico Tumbler Test Mistura de Sínter 1.....	96
Figura 54 – Gráfico Tumbler Test Mistura de Sínter 2.....	97
Figura 55 – Gráfico Tumbler Test Mistura de Sínter 3.....	98
Figura 56 – Gráfico Tumbler Test Mistura de Sínter 4.....	99
Figura 57 – Gráfico Tumbler Test Mistura de Sínter 5.....	100
Figura 58 – Gráfico Basicidade x Índice de Tamboramento.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais minerais de ferro e suas classes.....	17
Tabela 2 – Processo das Usinas.....	19
Tabela 3 – Propriedades físicas e químicas do sinter.....	52
Tabela 4 – Características químicas dos componentes de matéria prima.....	69
Tabela 5 – Características da moinha de carvão.....	69
Tabela 6 – Componentes das Misturas.....	69
Tabela 7 – Constituintes dos sinteres obtidos a partir das 5 misturas.....	84
Tabela 8 – Composição mistura 1.....	85
Tabela 9 – Análise química Mistura 1.....	85
Tabela 10 – Composição Mistura 2.....	86
Tabela 11 – Análise química Mistura 2.....	86
Tabela 12 – Composição Mistura 3.....	87
Tabela 13 – Análise química Mistura 3.....	87
Tabela 14 – Composição Mistura 4.....	88
Tabela 15 – Análise química Mistura 4.....	88
Tabela 16 – Composição Mistura 5.....	89
Tabela 17 – Análise química Mistura 5.....	89
Tabela 18 – Fet estimado nos sinteres.....	90
Tabela 19 – Basicidade das Misturas.....	90
Tabela 28 – Percentuais obtidos no Shatter Test Mistura 1.....	92
Tabela 29 – Percentuais obtidos no Shatter Test Mistura 2.....	92
Tabela 30 – Percentuais obtidos no Shatter Test Mistura 3.....	93
Tabela 31 – Percentuais obtidos no Shatter Test Mistura 4.....	94
Tabela 32 – Percentuais obtidos no Shatter Test Mistura 5.....	95
Tabela 33 – Percentuais obtidos no Tumbler Test Mistura 1.....	97
Tabela 34 – Percentuais obtidos no Tumbler Test Mistura 2.....	98
Tabela 35 – Percentuais obtidos no Tumbler Test Mistura 3.....	99
Tabela 36 – Percentuais obtidos no Tumbler Test Mistura 4.....	100
Tabela 37 – Percentuais obtidos no Tumbler Test Mistura 5.....	101

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

FeT – Ferro Total

GAF – Gás de Alto Forno

IQ - Índice de Queda

IT – Índice de Tamboramento

Pf – Peso Final

Pi – Peso Inicial

1. INTRODUÇÃO

Toda a estratégia produtiva dos vários segmentos industriais está estruturada em avaliar a competitividade, considerando a redução de custos aliados a sustentabilidade de seus processos de produção, visando de forma contínua a redução do consumo de recursos naturais e matérias primas de qualidade elevada e, por outro lado, a utilização de resíduos e matérias-primas de custo médio inferior.

Alternativa baseada em mudança de padrões tradicionais, baseados em inovações tecnológicas, tornando processos mais rentáveis, reduzindo impactos ao meio ambiente e buscando a reutilização de resíduos, se mostram como caminho eficaz para a criação de modelos mais ajustados à realidade de vertentes industriais, tais como as siderúrgicas que produzem gusa com carvão vegetal em altos fornos em Minas Gerais.

Com a redução da qualidade do minério de ferro em Minas Gerais trazendo consigo a redução de granulometria do minério e o aumento da sílica, os produtores se voltam a outras possibilidades, como a utilização de sinter em altos fornos a carvão vegetal, que buscam alternativas ao minério concentrado e vêem como caminho a operação com carvão de sinter (JACOMINO, 2002).

A princípio o carregamento dos altos fornos com sinter, traz ganhos econômicos e de produtividade e, dessa forma, produz um sinter de qualidade padrão em patamar de custo ajustado ao mercado.

Outra vertente de interesse se assenta na base da preservação ambiental. Com a visão ambiental e legislação específica que apoia iniciativas de sustentabilidade, utilizar resíduos de mineração e siderurgia na fabricação de sinter, substituindo minério bitolado carvão vegetal e etc., passa a ser um objetivo a ser perseguido.

Com esse cenário e com o quadro de custos elevados para os principais insumos utilizados na produção do ferro gusa, cabe desenvolver o trabalho de investigação da produção de sinter utilizando materiais disponíveis e resíduos nos parques siderúrgicos.

1.1. Objetivo

Na medida em que o sinter é fabricado utilizando finos de minério de ferro, outros finos e coprodutos para composição da mistura a sinterizar, estruturamos nosso estudo buscando compor a mistura com finos de minério com características lateríticas, Pellet Feed, moinha de carvão, pó de cal, finos degradados de retorno e pó de coletor.

O estudo tem como metas principais, estabelecer misturas de materiais disponíveis nos pátios das siderúrgicas e aglomerá-los via sinterização, buscamos equilibrar as misturas e comparar/avaliar os resultados da análise química do sinter e avaliar as características de resistência mecânica utilizando os ensaios padrão “Tumbler” e “Shatter”.

Como objetivo acessório analisamos o comportamento da resistência mecânica em função do índice de basicidade.

1.2. Justificativa

A justificativa geral para o trabalho repousa em estruturar um modelo capaz de associar pontos de ganho ambiental, de melhoria da qualidade da carga metálica nos fornos e de redução de custo para apoiar a utilização de matérias primas menos nobres e resíduos para síntese do sinter alternativo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Cenário Relativo a Mineração

Do ponto de vista da análise qualitativa do minério de ferro no Brasil pode-se assumir, de forma preliminar, como parâmetros básicos a avaliação granulométrica, característica física que encaminha o tamanho e sua distribuição; a composição química, tendo como foco de interesse o teor de ferro total e quantitativo/qualitativo do rol de impurezas integrantes do minério e também, o conjunto de parâmetros que afetam o processo metalúrgico/siderúrgico, definidos por intermédio de um lote apreciável de indicadores normatizados que definem níveis de performance.

O nível médio de teor de ferro considerado nas jazidas brasileiras, se estabelece em 50,3%, (IBRAM,2012). E as reservas nacionais representam cerca de 12% do potencial mundial.

Cabe ressaltar a competitividade de nossas jazidas em função de baixos índices de Fósforo, Alumínio e Enxofre.

É relevante considerar que a granulometria é um fator de grande importância após sua utilização, conseqüentemente tendo sua caracterização dada como minério granulado e também como minério aglomerado. Os granulados são fornecidos diretamente nos fornos de redução na medida entre 250 mm até 50 mm. Os aglomerados são tratados via processos de sinterização ou pelotização para padronizar a granulometria dos finos de minério alcançando o tamanho de 50 mm a 15 mm em sinter feed e um tamanho menor que 15 mm em pellet feed (IBRAM 2012). Fato a ser considerado é o da evolução do tamanho do granulado, redução da disponibilidade e incremento no nível de impurezas.

Sendo assim, para sua comercialização, os minérios de ferro são classificados da seguinte forma:

- Sinter: Aglomerado com adequação de granulometria para aplicação em usinas siderúrgicas após o processo de sinterização;
- Pellets: Pelotas em formato esférico com o objetivo do aproveitamento da parte mais fina do minério (pellets feed). Através do processo de pelotização ocorre a transformação em aglomerados de granulometria de 8mm a 18mm apresentando propriedades metalúrgicas superiores ao granulado devido a uniformidade;

- Lump: Minério granulado com maior valor comercial em razão a sua maior granulometria. Aplicado na siderurgia diretamente nos altos fornos sem necessidade de beneficiamento;
- Pellet feed: É a porção mais fina dos produtos de minério de ferro e com baixo valor comercial. Faz-se necessário o processo de pelletização para padronização da granulometria e aplicação na indústria siderúrgica em forma de pelotas;
- Sínter Feed: Finos apresentados como resultado do processo de britagem que são categorizados em seguida pela concentração de teor de ferro alcançando desta forma valor comercial.

Os minérios de ferro apresentam desempenhos distintos nos processos de mineração e siderurgia em relação a sua composição química, sua classificação dá-se de acordo com o seu composto metálico, são eles: óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos. Essa composição está descrita na Tabela 1, mostrando as nomenclaturas dos minérios de ferro utilizados comercialmente no Brasil (LEMOS, 2015).

As usinas siderúrgicas utilizam uma mistura de tipos de minérios geológicos denominados minério de ferro metalúrgico. Sendo assim, as usinas aceitam características químicas e físicas de acordo com a performance de seus processos. Para a comercialização utiliza-se duas classificações, sendo: minério base e minério de adição, este último usado para a correção compreendendo suas características químicas e físicas diferenciadas (LEMOS, 2015).

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- ferric
	Hematita	Fe_2O_3	69,9	Óxido ferric
		HFeO ₂ – Goethita	62,8	Hidróxido de ferro
		FeO(OH) –Lepidocrocita	62,85	
CARBONATO	Siderita	$FeCO_3$	48,2	Carbonato deFerro
SULFETOS	Pirita	FeS_2	46,5	
	Pirrotita	FeS	63,6	
SILICATOS	Fayalita	$Fe^{2+}_2(SiO_4)$	54,81	Grupo da Olivina
	Laihunite	$Fe^{2+}Fe^{3+}_2(SiO_4)_2$	47,64	Grupo da Olivina
	Greenalita	$Fe^{2+}_2.3Fe^{3+}_0.5Si_2.2O_5(OH)_3.3$	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

2.2. A Siderurgia

A siderurgia é compreendida como o ramo da metalurgia baseada no conjunto de técnicas e conceitos, onde abrange-se a extração, purificação, e modificação de metais ferrosos aplicados aos processos industriais de obtenção e tratamento de aços (CARDOSO, 2016). Conceituando a metalurgia, pode-se dizer que é a ciência e a tecnologia de extração dos metais a partir de seus minérios, transformando-os e utilizando-os na indústria, quando se trata de modo específico da metalurgia do ferro, dando assim o nome de siderurgia (SILVA, 2011).

Os aços são ligas de ferro com baixos teores de carbono, na faixa de 0,008% e 2%, descrito na ABNT NBR 6215:2011. Essas ligas ainda podem conter vestígios de outros elementos que tem a função de alterar suas propriedades, sendo possível a ocorrência de uma deformação plástica.

Para a produção do aço, o minério de ferro está entre as matérias primas mais importantes, desde sua quantidade e até seu custo. O Brasil detém uma das maiores reservas de minério de ferro do mundo: acima de 49 bilhões de toneladas; somente a Índia e a Rússia podem igualar-se ao nosso país (SILVA, 2011).

A incorporação de propriedades especiais no aço, tais como: tenacidade e resistência a corrosão, se faz necessário a adição de outras substâncias, sendo elas: níquel, cromo, silício e manganês. Outras formas de incorporação de propriedades especiais do aço são: laminação, tratamento químico, resfriamento e forjamento (USIMINAS, 2001).

Os aços dispõem de grandes propriedades mecânicas, são elas: resistência à tração, à compressão, à flexão, e como é um material homogêneo, pode ser laminado, forjado, estampado, estriado, sendo que, suas propriedades ainda podem ser alteradas por tratamentos térmicos ou químicos, considerado o mais variável dos metais. (SILVA, 2011)

Nas jazidas de minério de ferro, o elemento ferro é encontrado de forma natural associado ao oxigênio e sílica. A obtenção de suas características necessárias para a aplicação desse elemento no mercado dia a dia, dá-se na redução do minério a partir da reação de redução com carbono através da adequação de sua composição química e tratamentos termomecânicos, formando assim as ligas de aço.

A obtenção do aço em indústrias siderúrgicas dá-se através das usinas integradas, semi integradas e não integradas, no segmento de aços longos e planos descritos na Tabela 2. Sendo esses processos bem distintos e subdivididos em mineração; reflorestamento; redução e refino de aço; laminação a quente, a frio e trefilação.

Tabela 2 – Processos das Usinas

Usina Integrada	Usina Semi Integrada	Usina Não Integrada
Extração do ferro através de processo de redução;	Refino para conversão do ferro gusa em aço;	Redução do minério de ferro para obtenção de ferro gusa.
Refino para conversão do ferro gusa em aço;	Solificação através do lingotamento contínuo;	
Solificação através do lingotamento contínuo;	Conformação mecânica do metal na forma de produto nas laminações e trefilação.	
Conformação mecânica do metal na forma de produto nas laminações e trefilação.		

Fonte: Autor, 2018

2.2.1. Principais Insumos básicos para Siderurgia

Os materiais utilizados para o abastecimento do alto forno são: carvão, minério de ferro e calcário. A fusão dessas matérias primas atinge uma temperatura de 1200°C a 1500°C durante o processo de redução, originando o ferro gusa líquido.

Na redução do minério de ferro, as fontes de calor e carbono são os carvões minerais e os vegetais. Esses atuam como combustíveis no processo, após passarem pela coqueificação.

A diferença entre esses carvões é demonstrada na forma de obtenção de cada, onde o carvão mineral é extraído do carvão fóssil e o carvão vegetal é a carbonização da madeira de reflorestamento. Para o controle de combustão são adicionadas injeções colaboradoras de carvão pulverizado, óleo combustível e gás natural.

No processo do alto forno, o calcário é o principal fundente utilizado como escorificante, sua função é garantir a fluidez da escória para a ocorrência de reações de separação entre a escória e o metal, assim como, há retenção de suas impurezas.

O abastecimento no misturador, ou carros torpedos, é feito com ferro gusa para a manutenção e o transporte da temperatura de operação, onde é transferido para a próxima etapa de refino no conversor. Nas usinas não integradas, a solidificação do ferro gusa é feita na forma dos “pães de gusa”.

No conversor, dependendo da rota tecnológica utilizada, são adicionadas ao ferro gusa (líquido ou sólido), sucata, cal e oxigênio. Onde a sucata compõe a carga metálica, a cal faz a escorificação e o oxigênio catalisa as reações de carbono, influenciando também outros elementos, tais como: fósforo, sílica e manganês.

Para cada tipo de produção de aço são adicionadas ligas metálicas específicas no forno panela para o refino secundário no intuito de verificar a composição química e controle de inclusões. Entre essas ligas pode-se observar elementos como: ferro-manganês, ferro-cromo, ferro-silício, ferro-níquel, ferro-molibdênio, ferro-vanádio, ferro-titânio, ferro-nióbio, ferro-boro. Também pode-se adicionar outros elementos: alumínio, cálcio-silício, grafite e cobre.

Na condição de aço líquido, o transporte do material para o lingotamento é observando a geometria necessária para o processo de conformação mecânica pelo resfriamento do mesmo pela ação “spray” de água.

2.2.2. Redução e extração do Ferro

A rota tecnológica mais viável utilizada para a fusão redutora na extração do ferro gusa, desde seu minério, é durante o processo alto forno. Outra maneira também utilizada é a redução direta com obtenção de ferro esponja, porém, essa rota tecnológica é menos utilizada devido ao baixo rendimento metálico.

Na redução dos altos fornos para formação de escória e posterior obtenção do ferro gusa, são adicionados ao processo fundentes e carvão vegetal ou coque em altas temperaturas.

O abastecimento do minério de ferro pode ser nas formas granuladas ou aglomeradas, sinter ou pelotas. A carga metálica utilizada é composta, nos altos fornos brasileiros, por 80% de produto sinterizado (TAKEHARA, 2004), e o restante através de granulados ou pelotas. Essas afirmações consolidam a real necessidade de obter-se o conhecimento de todo o processo e a caracterização do sinter.

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 (MACHADO, 2007).

Durante a formação de escórias as primeiras impurezas que estão contidas no minério de ferro são retiradas. Um padrão importante considerado da escória é a basicidade, esta facilita reações que atingem o valor da relação CaO/SiO_2 de 1,2 para os altos fornos (MACHADO, 2007). A dessulfuração é uma dessas reações, sua função é a retirada do enxofre para a redução do impacto de fragilidade a quente do aço. Para favorecer esta reação a escória tem que ser rica em CaO, sendo assim básica, sobre a ação de atmosfera redutora.

A composição química aceitável 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 (MACHADO, 2007).

2.2.3. Transformação do ferro gusa em aço

A produção do aço na siderurgia ocorre nas aciarias, como matéria prima são utilizados nesse processo ferro gusa ou sucata ferrosa, cal para escorificação e oxigênio para reações oxidativas.

Existem vários processos para obtenção do aço, sua classificação dá-se pelo tipo de forno aplicado e origem da escória. Destaque-se entre os tipos de fornos os: Bessemer, Siemens-Martin, LD, Elétrico, etc., sendo os mais usuais os processos LD e fornos elétricos.

É esperado no processo de refino das aciarias:

- Reduzir os teores de carbono, silício, fósforo, enxofre e nitrogênio;
- Ajustar a temperatura para posterior envio ao lingotamento;
- Ajustar os elementos de liga para adequação de propriedades mecânicas dos aços.

A oxidação do carbono é eliminada na condição de gás pela ocorrência de CO e CO₂ enquanto que o silício, fósforo e enxofre são eliminados pela escória, sob forma de óxidos.

A basicidade da escória impacta diretamente nas reações do aço, escória e desgaste dos refratários, sendo de grande importância para o processo da aciaria. Os escorificantes normalmente aplicados são a cal (CaO), cal dolomítica (MgO) e fluorita (CaF₂) (JOHN et.al.,2009).

A reação de desfosfatização é favorecida pela escória básica, essa reação é de grande importância, o elemento fósforo um dos responsáveis pela fragilidade ao frio dos aços. A redução do fósforo chega até 90% com a adição de cal para o 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 (MACHADO, 2007).

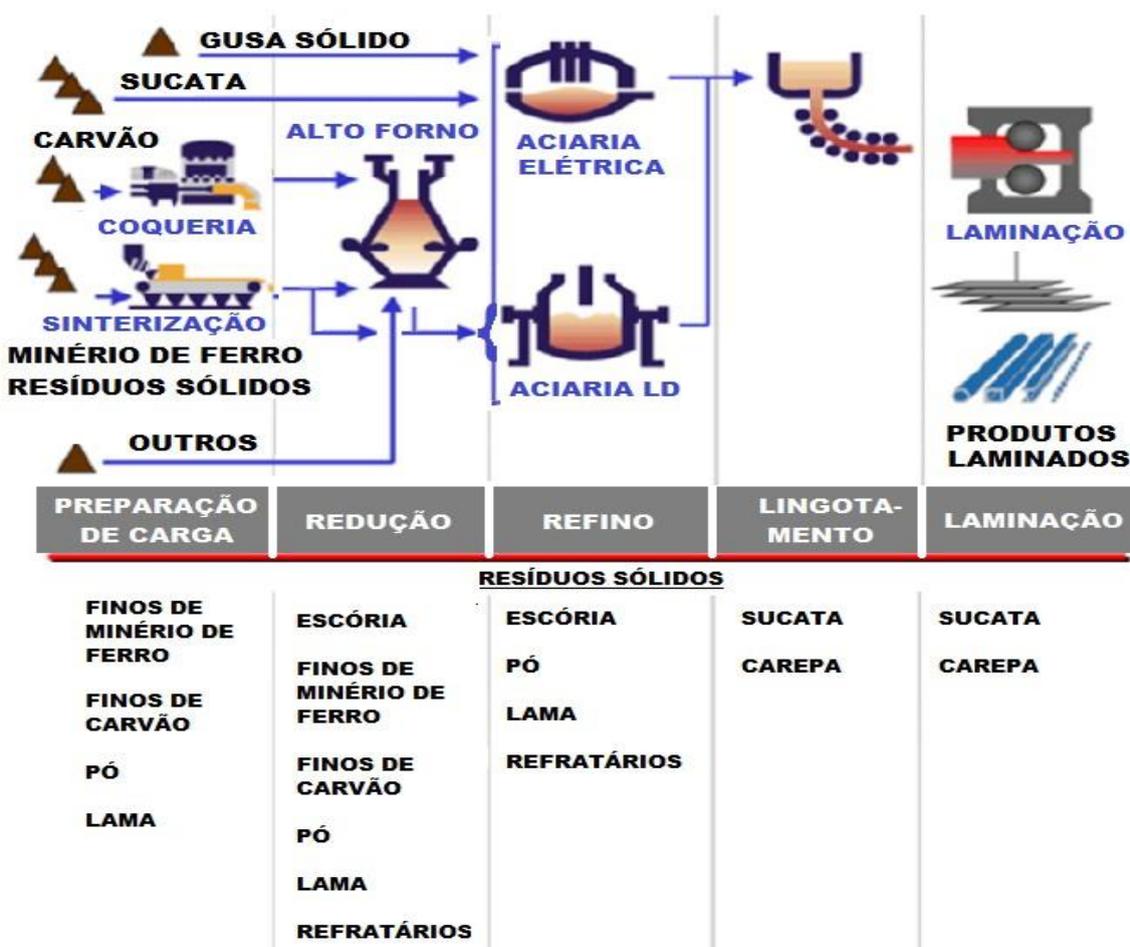
2.2.4. O impacto da Geração de Resíduos

A produção do aço no Brasil, em 2014, ficou em 33,9 milhões de toneladas equivalendo aproximadamente 2% da produção mundial, informação dada pelo Instituto Aço Brasil. O país ficou em 1^a no ranking da América Latina e 9^o produtor mundial no setor siderúrgico.

Constituindo um grupo de 11 empresas que operam 29 usinas, onde são 14 empresas integradas e 15 semi integradas, espalhadas em 10 estados, atendendo como prioridade ao mercado interno com capacidade de produção superior a demanda interna.

As organizações siderúrgicas estudam a competitividade empresarial visando o aproveitamento de resíduos e seu retorno econômico, através da redução de custos e retorno de impostos no produto final, com incentivo governamental. A Figura 1 mostra o processamento do aço e seus resíduos.

Figura 1 – Fluxograma da produção do aço e sua geração de resíduos sólidos



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

2.2.5. Fontes e tipos de Resíduos Sólidos Siderúrgicos

Em todos os processos da indústria siderúrgica, independentemente do tipo, são gerados resíduos, ou seja, materiais particulados e vários tipos de escórias de alto forno, de aciaria, de cobre, de ferro/tungstênio, ferro/titânio, de ferro/molibdênio e cromo metálico, que são retidos no sistema de despoeiramento (MACHADO, 2006).

As características de cada resíduo irão depender da composição química da matéria prima, ou seja, minério de ferro, carvão, calcário ou cal, utilizada no processo de fabricação dos produtos siderúrgicos, além do tipo de refratário utilizados nas paredes dos altos fornos (NASCIMENTO, 2005)

O problema do volume de resíduos sólidos está ligado à produção industrial de bens de consumo e intimamente ligado ao crescimento populacional e, em todos os países, os problemas decorrentes são semelhantes. (BARROS, 2002).

Nas usinas integradas, a cada 1 Ton de aço produzido, 700kg de resíduos sólidos são gerados. O reaproveitamento desses resíduos é feito para que não inviabilize a produção do aço pelos fatores econômico e ambientais.

A classificação desses resíduos através de suas atividades é: subprodutos ou coprodutos da fabricação do aço. Possui três destinos: descarte, reaproveitamento interno ou reaproveitamento externo.

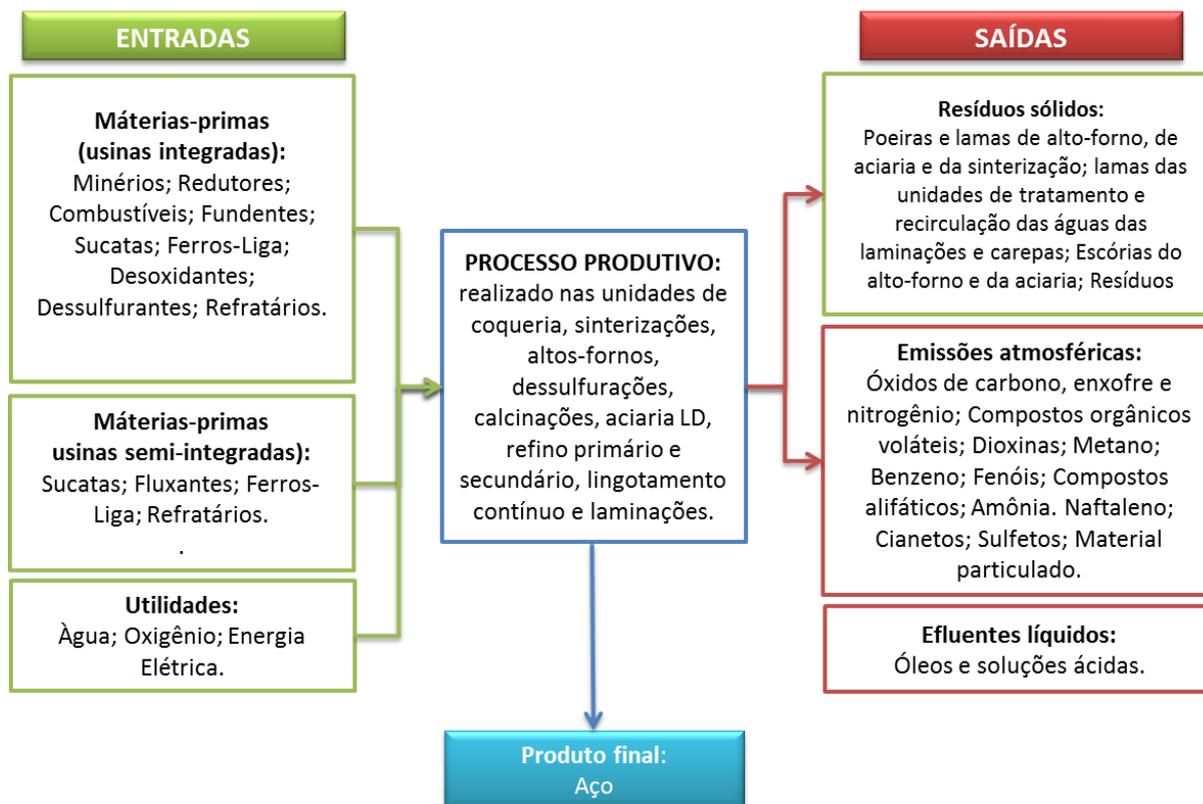
Nos dias atuais, segundo pesquisas, isso já não é tão aceito. A reciclagem de resíduos industriais vem aumentando em todo o mundo. Muitas empresas investem em pesquisa e tecnologia para reaproveitamento de rejeitos industriais, o que aumenta a qualidade do produto reciclado e propicia maior eficiência do sistema produtivo. (TAKANO, 2000)

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

Cerca de 450kg de “coprodutos e resíduos” são gerados a cada tonelada de aço produzida, segundo estima-se o Instituto Aço Brasil. Este valor está relacionado à rota tecnológica empregada e já chegou a superar a marca de 700 kg (IBS, 2007). Desta quantidade, são reutilizados ou reciclados cerca de 80% no ciclo do aço ou outros processos.

Em função das características e procedimentos das matérias primas utilizadas, os resíduos variam em relação a sua composição e aspecto. Na Figura 2 observa-se as entradas e saídas das rotas tecnológicas utilizadas na obtenção do aço.

Figura 2 - Obtenção do aço - diagrama de blocos



Fonte: Adaptado de MOURÃO, 2011.

Dentre as classes de resíduos presentes no diagrama, os sólidos são os que apresentam maior potencial para a reutilização e reciclagem, em especial aqueles que possuem teor de ferro em sua composição (MOURÃO, 2011). Nas classes de resíduos apresentadas no diagrama encontram-se: escórias, lamas, poeiras/pós e carepa.

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

As lamas também representam cerca de 5% dos resíduos, resultantes do tratamento dos gases por via úmida e são formadas por óxidos de ferro, cálcio, silício, manganês e alumínio (LOBATO, 2014). Sua classificação varia entre classe I - perigoso e classe IIA - não perigoso e não inerte, devido à possível presença de elementos tóxicos como cádmio, zinco, chumbo e arsênio.

Já o tratamento dos gases de processo ocorre por via seca, originam-se os pós, cuja geração alcança quase 15% do total de resíduos sólidos. Divididos em pó do alto forno e pó de aciaria elétrica, ambos são agrupados como classe I - perigoso. O primeiro é composto principalmente de óxidos metálicos e materiais carbonosos; já o segundo contém grande quantidade de metais como zinco, cromo, cádmio e chumbo (JACOMINO, 2002).

E finalizando, outro resíduo comum ao processo é a carepa, derivada da oxidação da superfície do aço nas etapas finais de lingotamento e laminação. Sua composição se resume à presença de óxidos de ferro, bem como uma grande quantidade de óleo; logo, corresponde à classe I - perigoso, de acordo com a NBR 10004 (ALMEIDA, 2009).

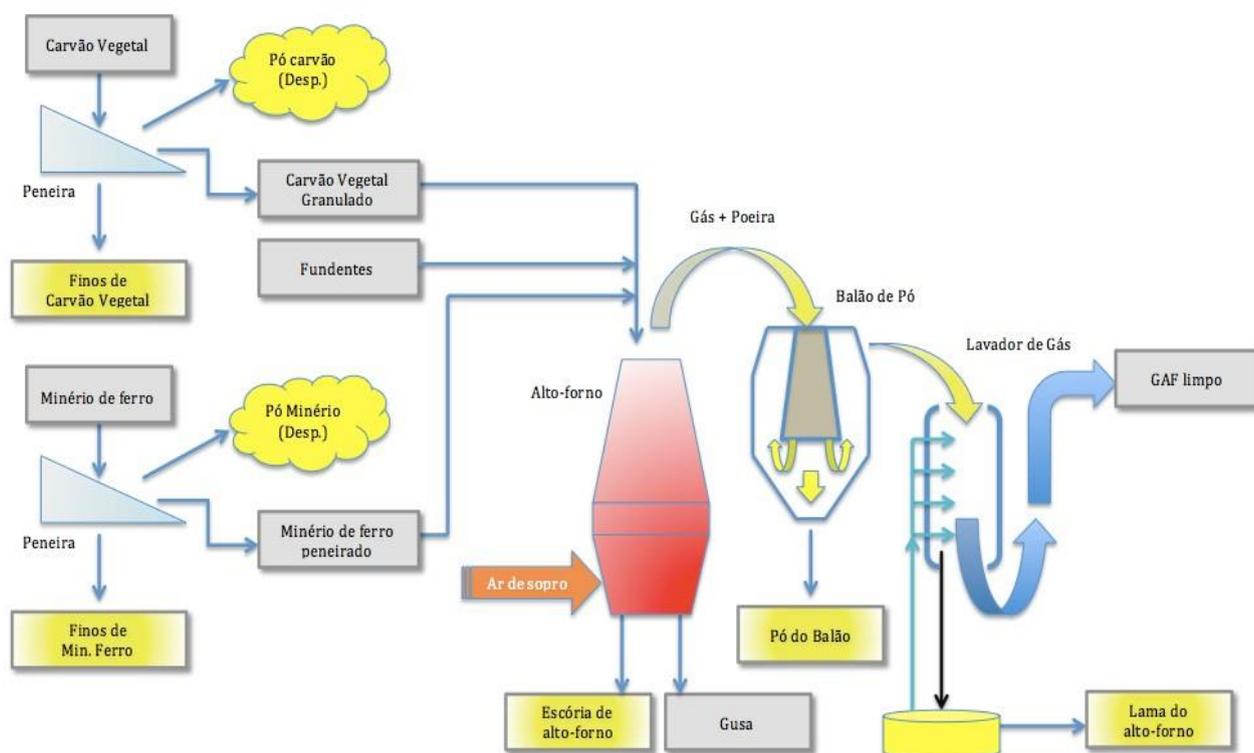
2.2.6. Resíduos Gerados na Siderurgia

A destinação correta dos resíduos gerados na produção do ferro gusa nos altos fornos a carvão vegetal geram resíduos sólidos desde a preparação da carga até o sistema de limpeza de gases, conforme demonstrado na Figura 3.

O minério de ferro e o carvão vegetal são peneirados durante a preparação da carga para o enforamento, esse processo gera resíduos no formato de finos de minério, carvão, pó de minério e carvão vegetal. Estes resíduos são coletados pelo sistema de despoejamento.

A formação de escória ocorre através das impurezas que estão na forma de sílica e alumina acompanhantes do minério de ferro. Por conter essas impurezas há necessidade de acrescentar fundentes para que a escória obtida possua menor ponto de fusão e basicidade que seja compatível aos altos fornos a carvão vegetal.

Figura 3 – Fluxograma da geração de resíduos em um alto forno a carvão vegetal.



Fonte: Arcelor Mittal, 2015

O gás do alto forno (GAF), oriundo da reação do ar de sopros com o carbono presente na carga, arrasta consigo considerável quantidade de poeira. A retirada desta é feita em duas etapas. Na primeira etapa, parte da poeira é retirada em um equipamento conhecido como balão de pó, onde há a desaceleração do gás e queda das partículas mais pesadas. Na segunda etapa, o gás passa pelo lavador, onde um spray de água remove a poeira ainda presente. A água contendo a poeira é enviada para uma estação de tratamento onde a lama é extraída por um processo de filtragem ou centrifugação (JACOMINO, 2002).

De acordo com as fases posteriores ao alto forno, outros resíduos são gerados como a escória de aciaria LD, escória de aciaria elétrica, pó de forno elétrico a arco, escória de forno painel, carepa de lingotamento contínuo e carepa de laminação a quente.

2.2.7. Tipos de resíduos sólidos siderúrgicos

A visão de ineficiência de um processo com perda de material, energia e altos custos, aliados a materiais destinados a aterros após a produção do aço, são chamados de resíduos sólidos. Alguns dos resíduos sólidos decorrentes da produção do aço devido à possibilidade de valorização comercial, estão sendo denominados de coprodutos (PÉRET et al., 2008). Sendo assim, os resíduos sólidos que são reprocessados para serem utilizados nos procesos siderúrgicos e que antes seriam descartados, são reutilizados na forma de coprodutos.

Os resíduos sólidos que são reaproveitáveis no processo podem ser divididos em quatro grandes grupos; as escórias, os recicláveis contendo ferro, os finos contendo coque e as sucatas. 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 (CARDOSO, 2016).

As escórias de siderurgia são materiais resultantes da produção de ferro gusa em alto forno e de aço em aciaria (ROCHA & FUINHAS, 1991). O processo siderúrgico do ferro gusa, em linhas gerais, caracteriza-se pela redução do ferro sob aquecimento a 1.900°C, a partir da mistura de minério de ferro, calcário e coque (PEREIRA, 1978). Os compostos não reduzidos (material inerte do minério e do coque) combinam-se com o Ca e o Mg do calcário, originando a escória de alto forno (PEREIRA, 1978).

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

Escória de alto forno é originada na produção do ferro gusa nos altos fornos e produzida normalmente de 500 a 600 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.

Já a escória de aciaria é oriunda do processo de refino do aço com geração aproximada de 100 a 150kg/t de aço líquido, são aplicadas como subproduto

principalmente em capas asfálticas de pavimento rodoviário, nivelamento de terreno e contenção de encosta, corretivos e fertilizante fosfatados para solos e produção de cimento e concreto. (CARDOSO, 2016).

Figura 4 - Escória produzida em aciaria elétrica



Fonte: SID SI, 2004

Finos, pós e lamas: provém da manipulação da matéria prima e são oriundas dos 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. A lama é formada pela remoção do pó no gás através de seu tratamento nos lavadores com fundo cônico, podendo atingir 30 a 50% na coleta de sedimentos sólidos. A lama é encaminhada para o sistema de filtragem e enviada para sinterização com 25% de umidade. (CARDOSO, 2016)

De acordo com (MACHADO 2006), 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. O pó de calcinação é originário na aciaria na preparação da cal, assim como a cal peneirada da própria sinterização.

2.3. Reutilização e Coprocessamento de Resíduos Sólidos

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.

2.4. Destinação dos resíduos siderúrgicos

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

As escórias de forno panela, com teor de cal superior a 50%, pode ser reaproveitada no próprio processo siderúrgico, inclusive na sinterização como fonte de CaO (OLIVEIRA, 2003). Quando se trata da destinação do pó de forno elétrico, o mesmo apresenta a desvantagem de conter zinco, oriundo do revestimento de materiais metálicos que viraram sucatas. (LOPES, 2012)

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

Portanto a utilização do pó do forno elétrico na sinterização está condicionada a se obter um sinter com teor de zinco suficientemente baixo que não cause prejuízos operacionais ao alto forno. (TELLES, 2010).

A tecnologia aprovada para o processamento do pó de forno elétrico é o forno rotativo Waelz, cujo processo consiste no carregamento de uma mistura de pó de forno elétrico, coque e fundentes no forno, o qual produz escória e óxido de zinco. Este processo já usado em países com Alemanha, Espanha e Estados Unidos, foi

trazido para o Brasil pela Votorantim Metais Juiz de Fora. (MANTOVANI, 1998)

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

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

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

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

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

2.4.1. Processos de aglomeração de sólidos particulados

A aglomeração é a união de sólidos particulados devido às forças químicas existentes entre as próprias partículas e outras de caráter físico com baixo alcance. Para processar os resíduos siderúrgicos torna-se necessário aglomerá-los, visando sua coesão através de mecânicos químico-físicos na ligação rígida das partículas entre si, objetivando o tamanho e forma de maneira que permita seu uso na produção de aço (PIETSCH, 2003).

Cabe ressaltar que não se deve utilizar finos de minério de ferro diretamente na carga metálica no alto forno, estes finos prejudicam o processo de contracorrente através do qual os fluxos gasosos ascendem e os sólidos descem otimizando a troca de calor (MOURÃO, 2008). Uma questão relevante consiste na análise dos avanços realizados no processo de preparação do minério de ferro, por intermédio de sistemas de aglomeração. A seguir explana-se um pouco sobre os três principais tipos de aglomeração.

2.4.2. Processo por Briquetagem

A briquetagem consiste em aglomerar partículas através de pressão que é imposta sobre a matéria prima, o objetivo é a obtenção de um produto compacto, chamado de briquete (LEMOS, 2015). A reciclagem de resíduos siderúrgicos ocorre através da briquetagem, onde pode-se reutilizar o material na própria usina.

A briquetagem que consiste em aplicar pressão sobre uma porção de massa de material particulado, pode-se ou não adicionar ligante, e posteriormente pode-se utilizar tratamento térmico. Nesse processo ocorre o envolvimento da força coesiva entre as partículas dos finos, a contribuição da adesividade do ligante, e a contribuição do comportamento reológico do binário partícula/ligante e, fundamentalmente, propriedades físicas das partículas e propriedade química de superfície.

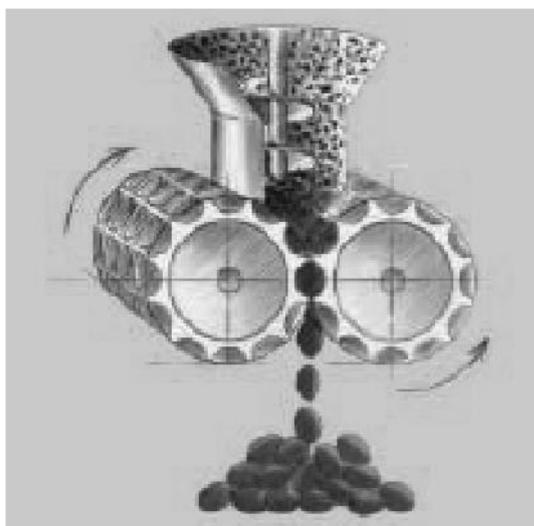
Sendo assim, compreende-se que a briquetagem é o processo de aglomeração de minúsculas parcelas de material sólido através de pressão adequando a moldagem do coproduto em maiores dimensões e de forma compacta

com parâmetros mecânicos definidos. Dessa forma estes materiais aglomerados podem ser empilhados acarretando facilidade no transporte e armazenamento (CARDOSO, 2016).

Os aglomerados devem ter resistência ao manuseio, estocagem e para utilização no processo de alimentação dos altos fornos. Muitos são os fatores que podem influenciar na construção dessa resistência, tais como: pressão de briquetagem, teor de ligantes, umidade, temperatura e o tempo de cura.

Na briquetagem os processos mais usados são: pistão e rolo. O critério na escolha do melhor método é estabelecido em função do consumo de energia, custos de investimentos e produtividade. É demonstrado o princípio da compressão em prensa na Figura 5.

Figura 5 – Compressão em prensa de rolos.



Fonte: KÖPERN (et. al.)

A força que atua no material depende da granulometria, considerando-se que quanto mais fino o material, maior a quantidade de vazios que serão descartados no processo de briquetagem. Este fenômeno também influencia diretamente a contração volumétrica do material durante a sua compactação, e assim a densidade do mesmo (CARDOSO, 2016).

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 subdividido nas modalidades matriz, película e

químicos. (KOMAREK et.al., 1967).

O aglomerante utilizado nos processos siderúrgicos é o cimento Portland para briquetes com cal ou carepa e melação na aplicação do minério de ferro, existe outro tipo de aplicação, conhecida como briquetagem de finos de carvão.

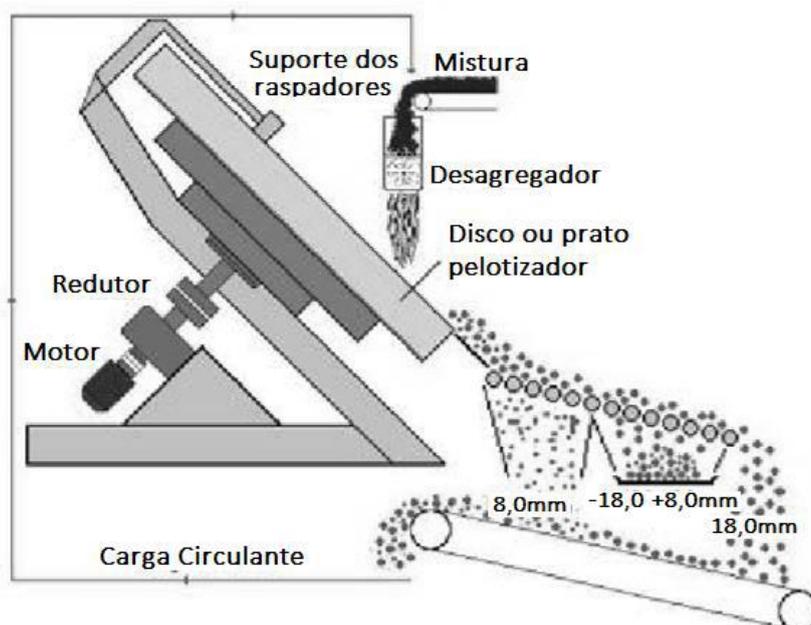
Os aglomerantes da modalidade matriz estruturam sistemas de engastamento das partículas, a partir de uma fase aglomerante basicamente contínua. Os aglomerantes da modalidade película, agem como colas que normalmente dependem de forma severa da evaporação de água ou algum outro tipo de solvente no sentido de desenvolver a resistência. Os aglomerantes da modalidade solvente são algumas vezes utilizados, mesmo que o material processado possa ser somente briquetado através de pressão, dessa forma podem ser encaminhadas menores pressões, e os briquetes resultantes possuem uma estrutura mais rica em poros. Os aglomerantes ditos químicos podem ser da modalidade película ou matriz (ROCHA & FUINHAS, 1991).

Para finalizar o tema em questão, observa-se que o sistema de endurecimento ocorre à 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.

2.4.3. Processo via Pelotização

As pelotas são materiais aglomerados provenientes de finos de minério de ferro - pellet feed – gerados pela britagem do minério na área de mineração (SILVA, 2010). Essas pelotas são cargas de fundamental importância na sustentação dos fornos de redução para obtenção do ferro primário dos fornos de redução à carvão para produção do ferro gusa, em adição ao sinter e ao minério granulado.

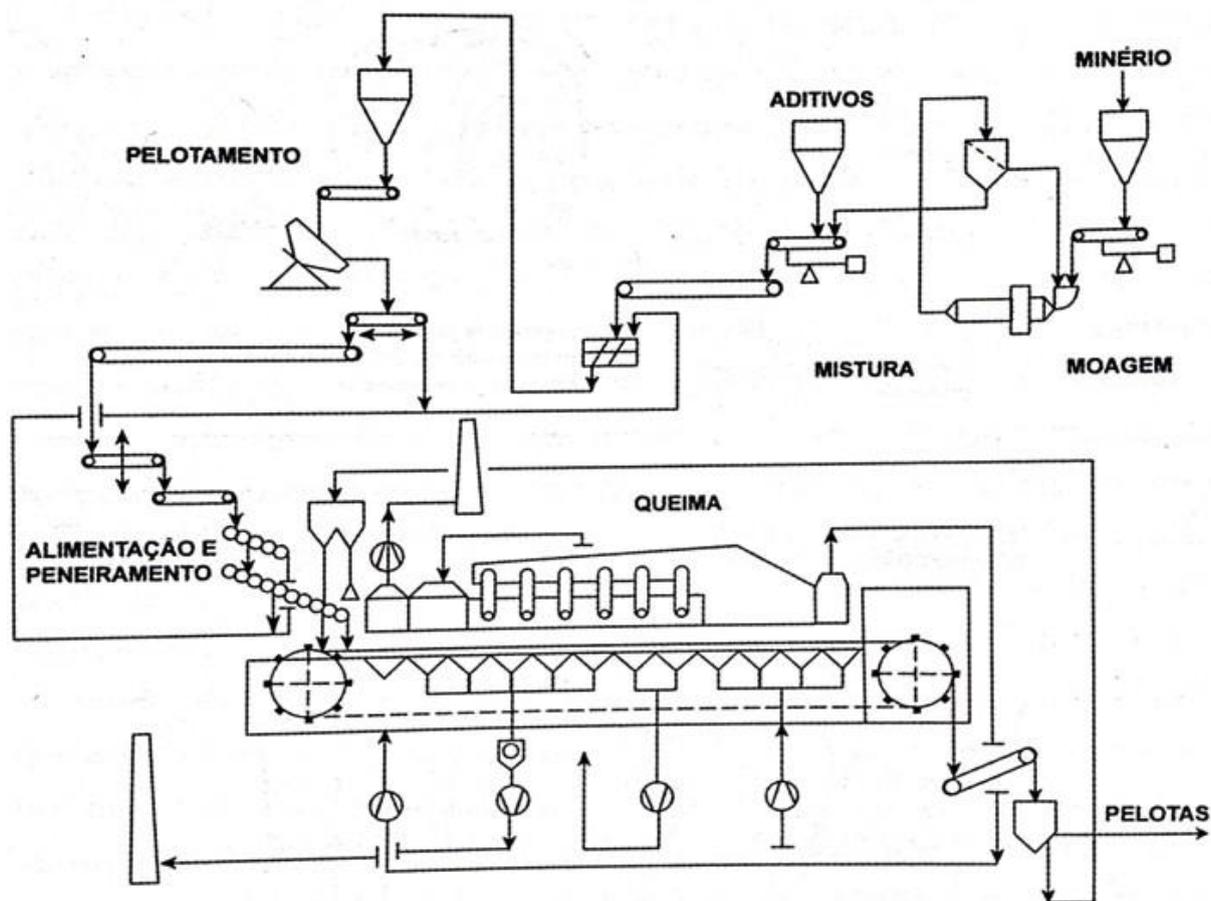
Figura 6 – Disco de Pelotamento



Fonte: CARDOSO, 2016.

A Pelotização é um processo de aglomeração que consiste em mistura de finos de minério de ferro com fração inferior a 0,149 mm utilizando montantes pré determinadas de aglomerantes, óxidos básicos e materiais energéticos, a mistura segue então para processo de rolamento em disco ou tambor, que através das interações da tensão superficial de capilaridade, encaminha a formação de material aglomerado esférico com dimensão em 8 e 18 mm, estas pelotas, são posteriormente submetidas a um tratamento térmico, garantindo integridade durante o manuseio e, em função da concentração do teor de ferro, apresentam adicionalmente propriedades metalúrgicas superiores ao minério quando presentes na carga metálica no processo de redução (CAMPOS & FONSECA, 2010).

Figura 7 - Diagrama do sistema de pelotização



Fonte: MOURÃO, 2007

Dessa maneira entende-se que a pelotização é o modo produtivo que utiliza compressão ou moldagem de um material particulado e conforma esta matéria prima em produto esférico conhecido como pelota. Este processo de fabricação compreende três estágios: etapa de preparação e mistura das matérias primas, conformação das pelotas e por fim, processamento térmico para incremento da resistência.

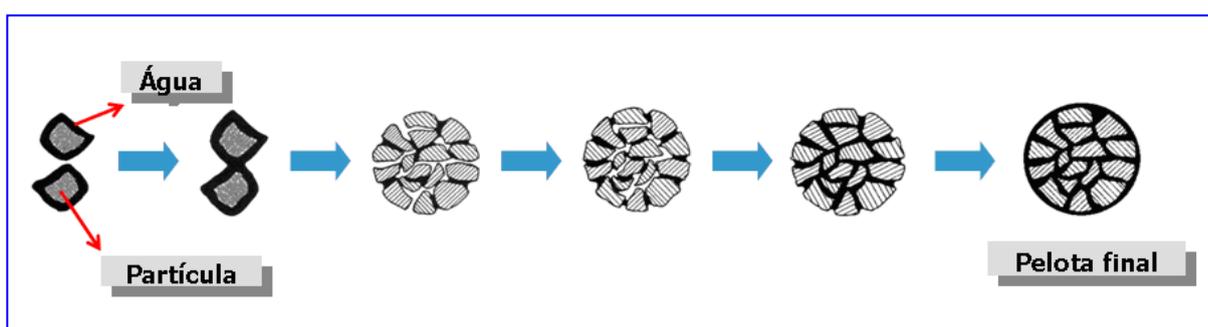
A pelotização pode ser fornecedora da sinterização quando esta produz micropelotas crua como matéria prima no lugar do “sinter feed” para nucleação a fim de tornar a mistura permeável permitindo a homogeneidade no leito. Um dos principais parâmetros que garante esta homogeneização é o grau de umidade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

A localização das plantas de pelotização pode em muitos casos se situar junto as minas, como no caso da Vale do Rio Doce 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, no porto de Ubú e na Vale do Rio Doce situada Vitória do Espírito Santo e São Luiz do Maranhão. (MOSZKOWICZ, 2004).

Em todo processo de produção o foco é a qualidade do produto final, e para alcançar esse objetivo as etapas que antecedem o processamento devem ser executadas corretamente. Para que se obtenha pelotas com alta resistência na etapa de endurecimento, caso elas tenham sido mal formadas nas etapas anteriores.

Figura 8 - Mecanismo de formação da pelota



Fonte: Adaptado de (Srb & Ruzicková, 1988)

A partir da umectação de uma partícula, é formado na superfície um fino filme de água que quando em contato com outra partícula também úmida, promove uma ligação efetiva entre estes dois filmes.

O núcleo da pelota é formado por essas partículas inicialmente unidas, e o crescimento da pelota ocorrerá em torno desse núcleo. O processo encaminha a adesão de mais partículas aos núcleos enquanto estes vão sendo rotacionados, gerando esferas.

Cabe ressaltar que uma quantidade relevante de ar se mostra presente no interior da pelota e dessa forma a resistência mecânica comprometida. Entretanto, na medida em que se multiplicam os choques entre as partículas o ar aprisionado vai sendo expulso e intensificam-se as forças de ligação.

É necessário que esse processo se desenvolva garantindo as efetivas forças de ligação e só então, as pelotas estão aptas a seguir para as etapas subsequentes. Cabe ressaltar que a aglomeração se mantém em função da força de capilaridade resultante da tensão superficial. Essa tensão é fundamentalmente ocasionada pela

coesão entre as moléculas do líquido e pela força de adesão entre a superfície do material e o líquido (SRB & RUZICKOVÁ, 1988).

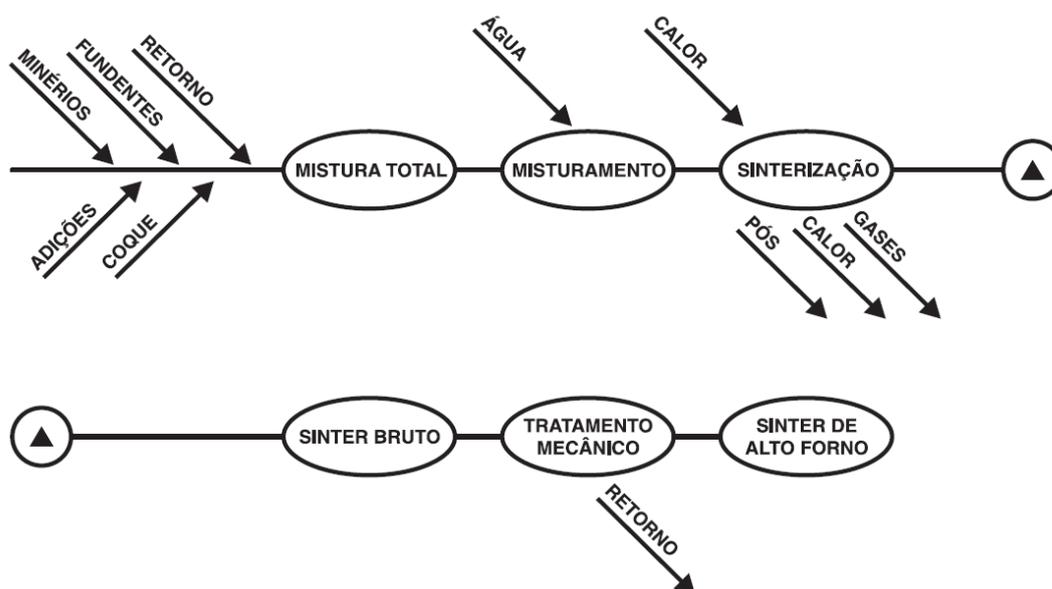
2.4.6. Processo via Sinterização

2.4.6.1. Definição e conceitos

O processo de sinterização se baseia na mistura e aglomeração a quente de finos de minérios, carvão, calcário e resíduos, tais como: pó de coletor, carepa e finos degradados de retorno. Antes da mistura são dosados os constituintes buscando composições químicas definidas, com o objetivo de produzir o sinter com características físicas, metalúrgicas e químicas compatíveis com as demandas durante a redução no alto forno (NAJAR 1981).

O processo de sinterização pode ser melhor definido conforme esquema na Figura 9.

Figura 9 - Esquema representativo do processo de Sinterização.



Fonte: Honorato, 2005

A sinterização é um processo de aglomeração que utiliza como base, finos de minério de ferro provenientes da mineração ou do sistema de britagem do minério. Os finos de minério são misturados a rejeitos sólidos industriais e combustível,

transformando-os através da fusão incipiente da queima em matéria prima assumindo um aspecto poroso com morfologia de maior granulometria denominado sínter. Durante a sinterização, um conjunto de coprodutos de granulação fina é misturado e micropelotizado estruturando-se corpos coesos por intermédio de mecanismos físico-químicos quando submetidos a elevadas temperaturas menores que a temperatura de fusão.

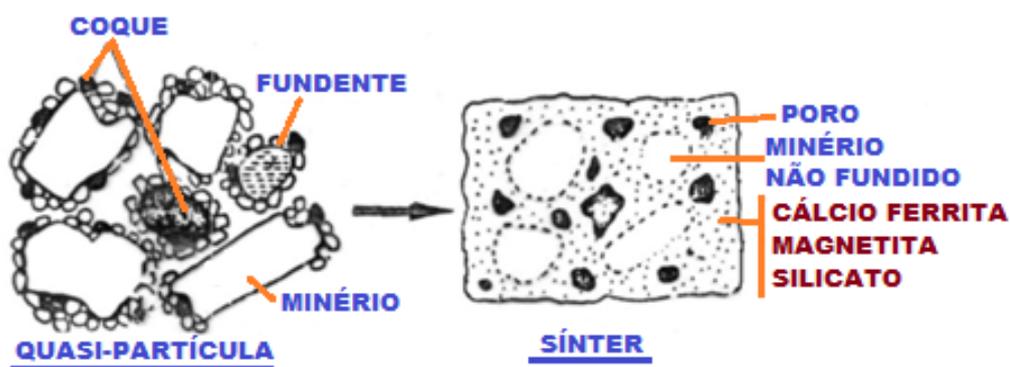
O foco do processo é a criação de nova matéria prima aglomerada, agora denominada de sínter, com dimensões e formas adequadas (CARDOSO, 2016).

Os indicadores imprescindíveis à caracterização do sínter são (Honorato 2005):

- Garantia da composição química livre de contaminantes;
- Composição química estável;
- Elevado teor de ferro;
- Baixo volume de escória;
- Elevada resistência mecânica;
- Granulometria estável;
- Baixa porcentagem de finos;

O processo de sinterização é demonstrado na Figura 10.

Figura 10 – Esquema simplificado do processo de sinterização.



Considerando as características do material a ser processado na sinterização devem ser observadas análises químicas e físicas no coproduto além das condições técnicas para a execução da operação na determinação da resistência do sínter, ou seja, a temperatura de processamento na queima, velocidade da frente de sinterização e taxa de resfriamento do bolo de sínter, aplicação ou não de aglutinante, percentual de umidade da mistura, morfologia do sínter. Considerando as possibilidades de matérias primas utilizadas no processo, o “sínter feed” consiste da mistura dos vários tipos de minérios de ferro sendo estes: 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) (CARDOSO, 2016).

Devem ser observadas as características: capacidade de aglomeração a frio, questões relativas a porosidade, morfologia de grão, incidência de crepitação, densidade, a granulometria deve variar entre o limite superior de 0% de fração > 10,0 mm; a parcela média variando de 45% a 60% da fração de 1 mm a 10,0 mm; e o limite inferior menor de 15% da fração < 200 mesh (MACHADO, 2006).

Para as características físicas de forma e tamanho as operações complementares e pré preparação do processamento são de grande valia, deve observar-se como características principais a secagem, o ajuste de temperatura, 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 ocorrência da remoção de impurezas que possibilitam uma faixa adequada de fluidez da escória. (CARDOSO, 2016).

Sendo assim, existem 2 tipos de sinter:

- Auto fundentes: Neste caso utiliza-se o acréscimo de fundentes onde os sínteres são caracterizados pela relação CaO/SiO_2 denominada basicidade. Quando esta relação é inferior a 1 são descritos como ácidos, e quando essa relação é maior que 1 são denominados básicos.
- Não auto fundentes: São originários de minério de ferro hematítico ou magnético portando SiO_2 e Al_2O_3 , e sem os constituintes CaO e MgO .

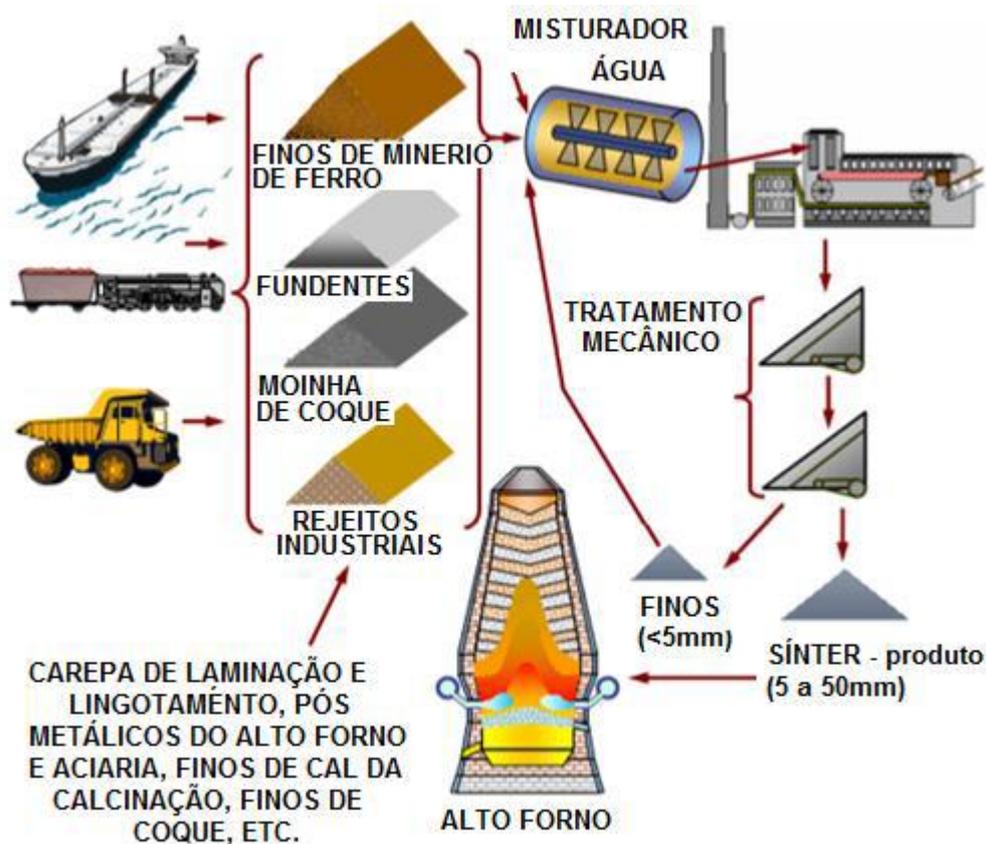
Fundentes aplicados aos processos com granulometria para sinterização é encontrada em torno de 0 a 3mm e de 10 a 30mm (MACHADO, 2006).

- Calcário (portador de CaO);

- Cal (portador de CaO);
- Dunito (portador de MgO e SiO₂);
- Serpentinó (portador de MgO e SiO₂);
- Dolomita (portador de MgO e SiO₂);
- Quartzó (portador de SiO₂).

O processo de sinterizaç3o com suas entradas e saídas no processamento do sinter é demonstrado na Figura 11.

Figura 11 – Fluxograma esquemático do processo de sinterizaç3o.



Fonte: CARDOSO, 2016.

Uma das principais caraterísticas nos processos siderúrgicos é o rendimento metálico demonstrando a eficiênci do consumo da matéria prima que está sendo empregada. Desta maneira, de forma indireta, o rendimento é uma mediç3o da

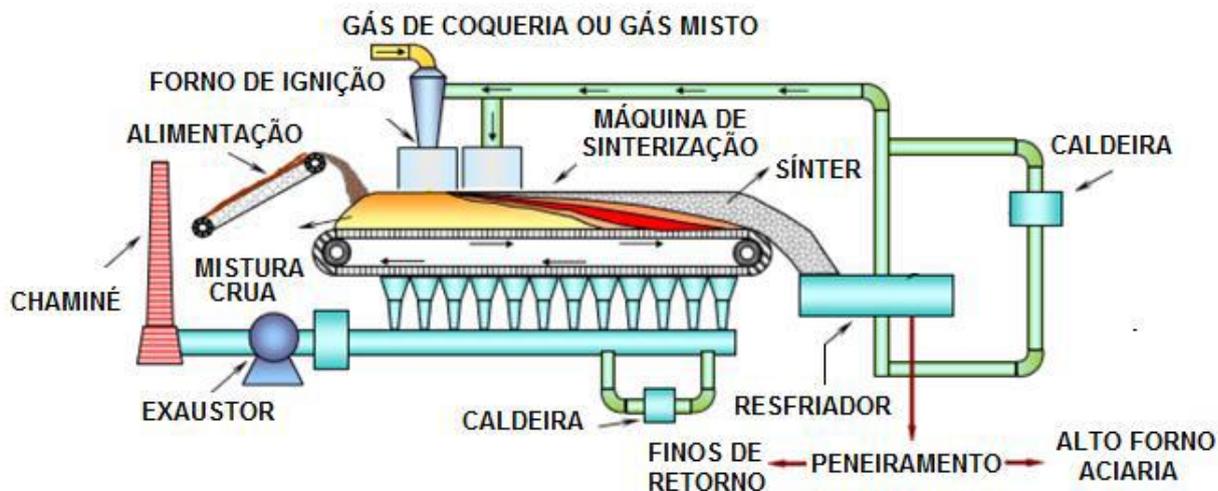
propriedade de redutibilidade do sinter diferenciada para cada mistura entre os finos de minério de ferro e resíduos sólidos. Quando produzidos apenas com minério de ferro, o sinter apresenta-se com baixo índice de redutibilidade em função da alta taxa de incidência de “fayalita”, proveniente da sílica constituinte da ganga de minério, dessa forma torna-se necessário o abastecimento adicional no alto forno de cal e quartzo trazendo como inconveniente o incremento do consumo de coque. Assim sendo, a aplicação de fundentes na mistura do sinter mostra-se como uma alternativa para a redução do consumo de coque do alto forno (CARDOSO, 2016).

Pode-se observar uma outra questão no consumo do sinter na produção do aço que é a refrigeração, que depende da composição química oferecida durante a sinterização, permitindo o auxílio ao controle de temperatura do metal líquido na aciaria. A função do aglutinante é manter a capacidade de resistência ao esforço de compressão e ao impacto durante o transporte e armazenagem após a aglomeração do material, agindo como matriz fundamentalmente contínua.

O nível de temperatura durante o trabalho no processo de sinterização é determinado experimentalmente com base nas características do coproduto, tais como o formato e tamanho das partículas. Desta forma é definido o tempo de residência durante o processo de queima. 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 (CARDOSO, 2016).

Existem dois processos industriais tradicionais para sinterização de minérios que podem ser utilizados, são eles: Green Walt, que é um processo intermitente utilizado em usinas de pequeno e médio porte, atingindo a capacidade de 1500t/dia e também o processo Dwight-Lloyd, este é contínuo utilizado em grandes usinas siderúrgicas e hoje também adaptado às usinas de porte pequeno e médio que utilizam em seus altos fornos carvão vegetal. Demonstrado na Figura 12.

Figura 12 – Esquema básico representando o sistema de sinterização contínua do tipo Dwight–Lloyd.



Fonte: CARDOSO, 2016.

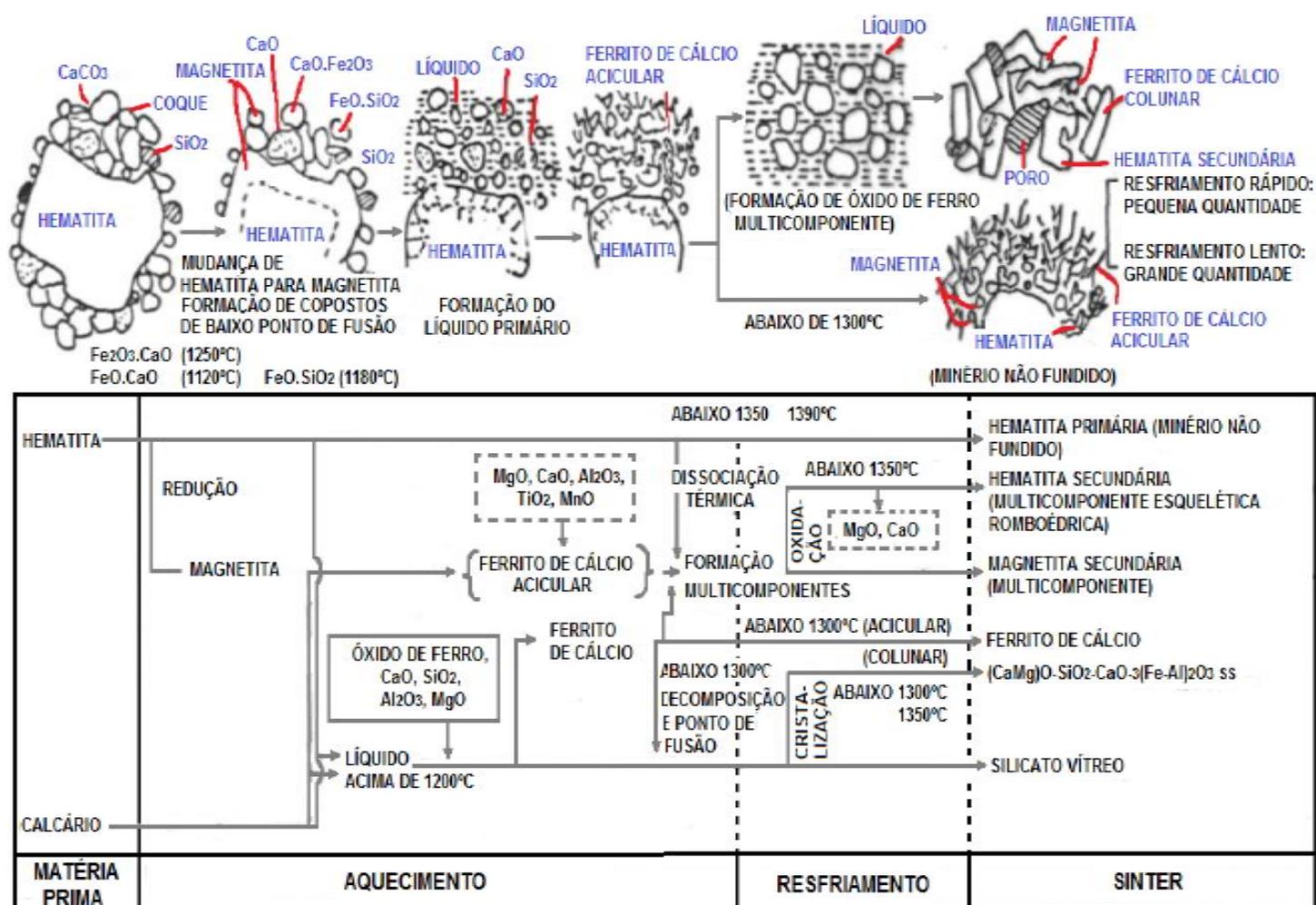
No processo convencional de sinterização de minérios as reações são ativadas e potencializadas pelo calor e pela temperatura no estado sólido da mistura durante o processo. Dentre as principais etapas para a produção do sinter, destacam-se:

- 1) A dosagem dos finos de minério de ferro, dos fundentes, adições, resíduos sólidos desagregados, finos de sinter de retorno e combustíveis sólidos.
- 2) Adição de água via spray com vistas a umidificação da mistura para controlar a permeabilidade das camadas com o objetivo de construção de produto com resistência mecânica adequada.
- 3) Carregamento controlado da mistura em panelas, nas sinterizações semi contínuas/leito através de esteiras contínuas em sinterizações contínuas para o processamento.
- 4) Promoção da ignição e assim da combustão da superfície da mistura pela chama gerada no forno sobre o leito de mistura pela ação de maçaricos (forno de ignição).
- 5) Desenvolvimento e caminhada da frente de combustão através da queima do combustível disseminado na mistura através da passagem do ar de processo proveniente do sistema de exaustão, que reage com

as partículas combustíveis na mistura.

- 6) Microadesão de partículas metálicas considerando mecanismo de fusão parcial, tipo caldeamento, das mesmas estabelecendo ligação por uma matriz de escória. Pode-se dessa forma, observar o aumento na densidade seguido do início do processo de fechamento dos vazios.
- 7) A frente de combustão (frente de sinterização) atravessa toda a carga a ser sinterizada no forno, de cima para baixo, e devido ao contínuo fluxo do ar de sucção, inicia-se o resfriamento da massa de sínter até a falsa grelha inferior.

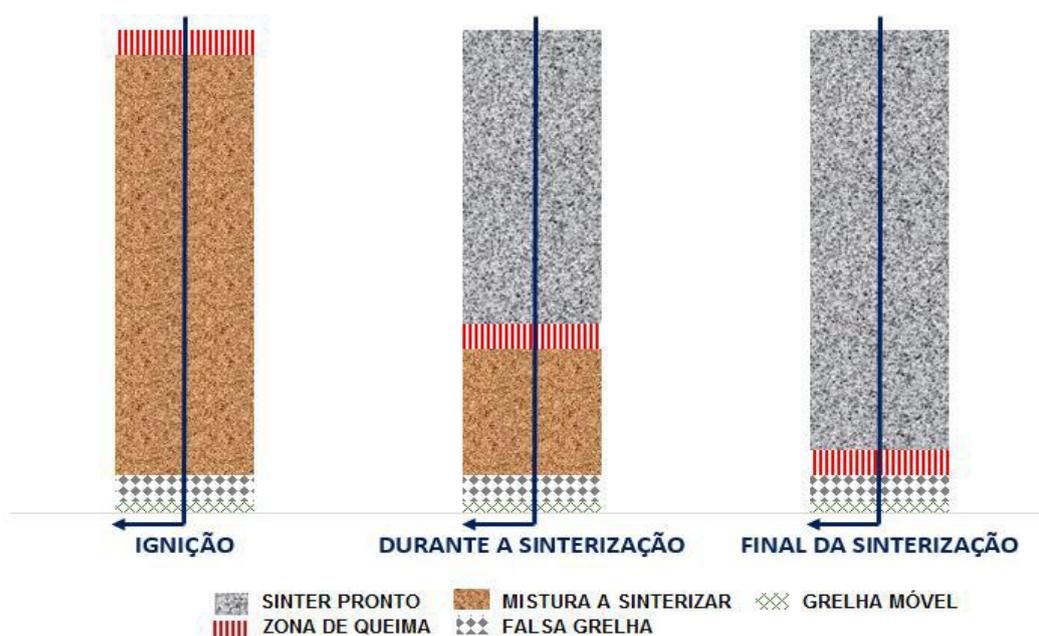
Figura 13 – Esquema do princípio da sinterização



Fonte: CARDOSO, 2016

No esquema apresentado na Figura 14 é demonstrado o efeito da sucção de ar, de cima para baixo, e o avanço e desenvolvimento da frente de combustão contemplando todas as fases de sinterização das camadas até que a frente de sinterização tangencie a base do leito de mistura, completando o processo para a saída da massa de sínter.

Figura 14 - Esquema de progressão da frente de combustão



Fonte: MACHADO, 2006

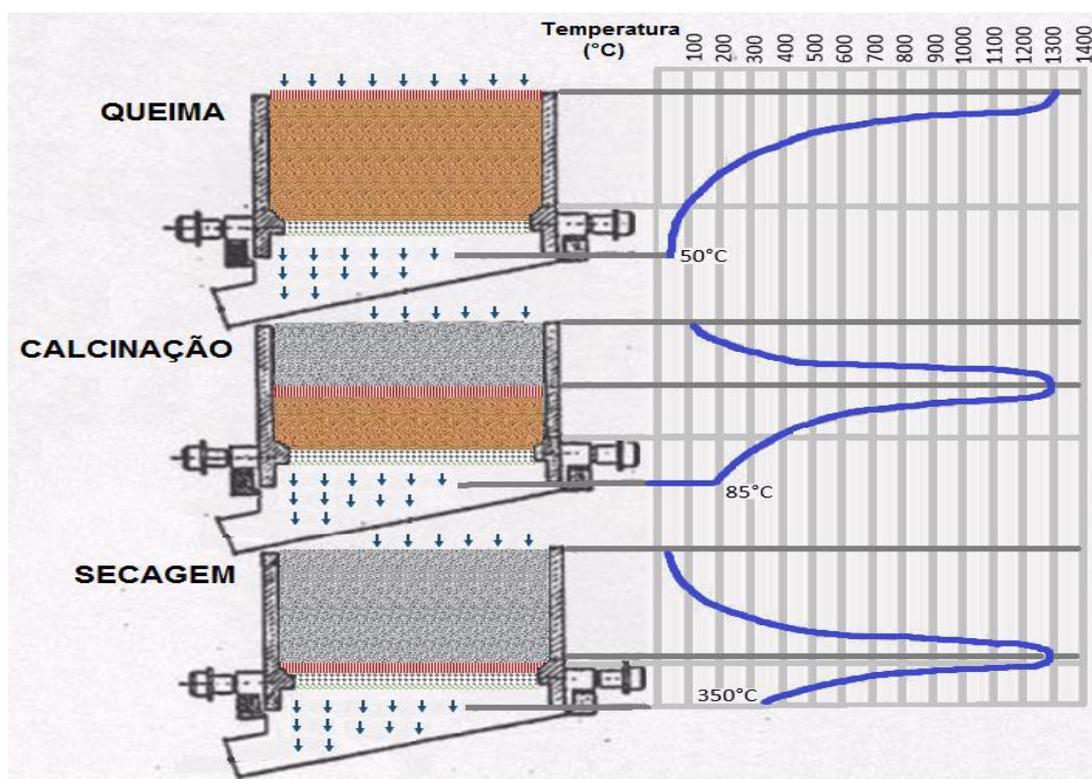
O ar atravessa a mistura de cima para baixo sob ação dos exaustores passando através de toda a mistura ocorrendo os fenômenos de transferência de calor e ativação de reações químicas. A continuidade da combustão é dada através das reações ativadas na frente de combustão caminhando até o fundo do leito na região das 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 mássica, adicionalmente, e a reatividade e percentual de quantidade de combustível.

Os desenvolvimentos desses dois fenômenos principais ocorrem das seguintes formas: transporte de calor - é proveniente da sucção forçada de ar que atravessa todo o leito de sinterização, criando uma frente queima, estabelecendo uma taxa de velocidade de propagação que deve ser proporcional à vazão de ar; e

a combustão do carvão - que produz calor, estruturando uma frente adicional de reação química, em que evolução é uma função que compreende a reatividade, a quantidade de combustível, e a taxa de umidade e os constituintes químicos da mistura. (TAKEHARA, 2004).

A cada etapa do processo de sinterização, as temperaturas são demonstradas na Figura 15, onde a zona que queima chega a temperatura de 1300°C e o ar depois da grelha móvel chega a 50°, durante o início do processo até a queima, atingindo 350°C na secagem.

Figura 15 – Esquema de máquina de sinterização intermitente demonstrando avanço e temperatura da frente de combustão.



Fonte: MACHADO, 2006

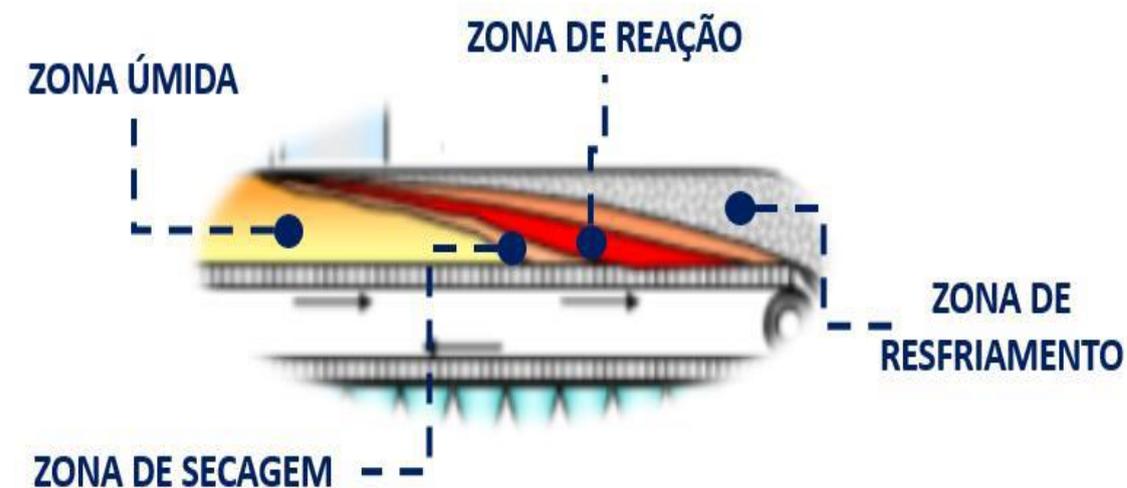
A medição de temperatura depois da saída do ar de sucção é o indicador térmico do processo, indicada como uma avaliação indireta que aponta para a qualidade do sinter.

Observa-se que a temperatura mais elevada é notada no momento da ignição seguindo a frente de queima na mistura. Ocorre a transição térmica do ar de sucção e a carga até que a combustão alcance o final da esteira.

O processo de sinterização é determinado por etapas divididas em zonas, são elas: úmida, secagem, reação e resfriamento. As zonas são demonstradas na figura abaixo.

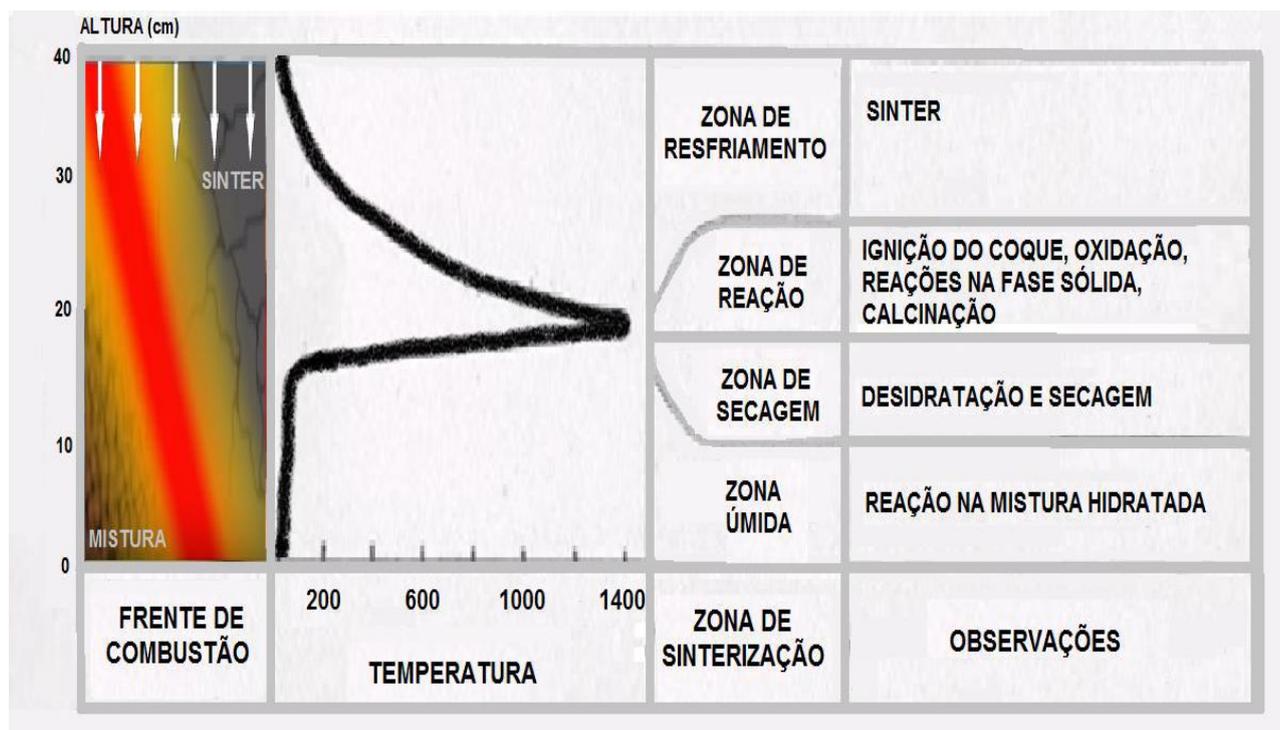
A temperatura em cada uma das zonas é característica as reações de transformação e são representadas através da Figura 16.

Figura 16 – Corte longitudinal do leito da máquina de sinterização contínua.



Fonte: CHAVES, 2009

Figura 17– Corte transversal do leito de uma máquina de sinterização contínua.



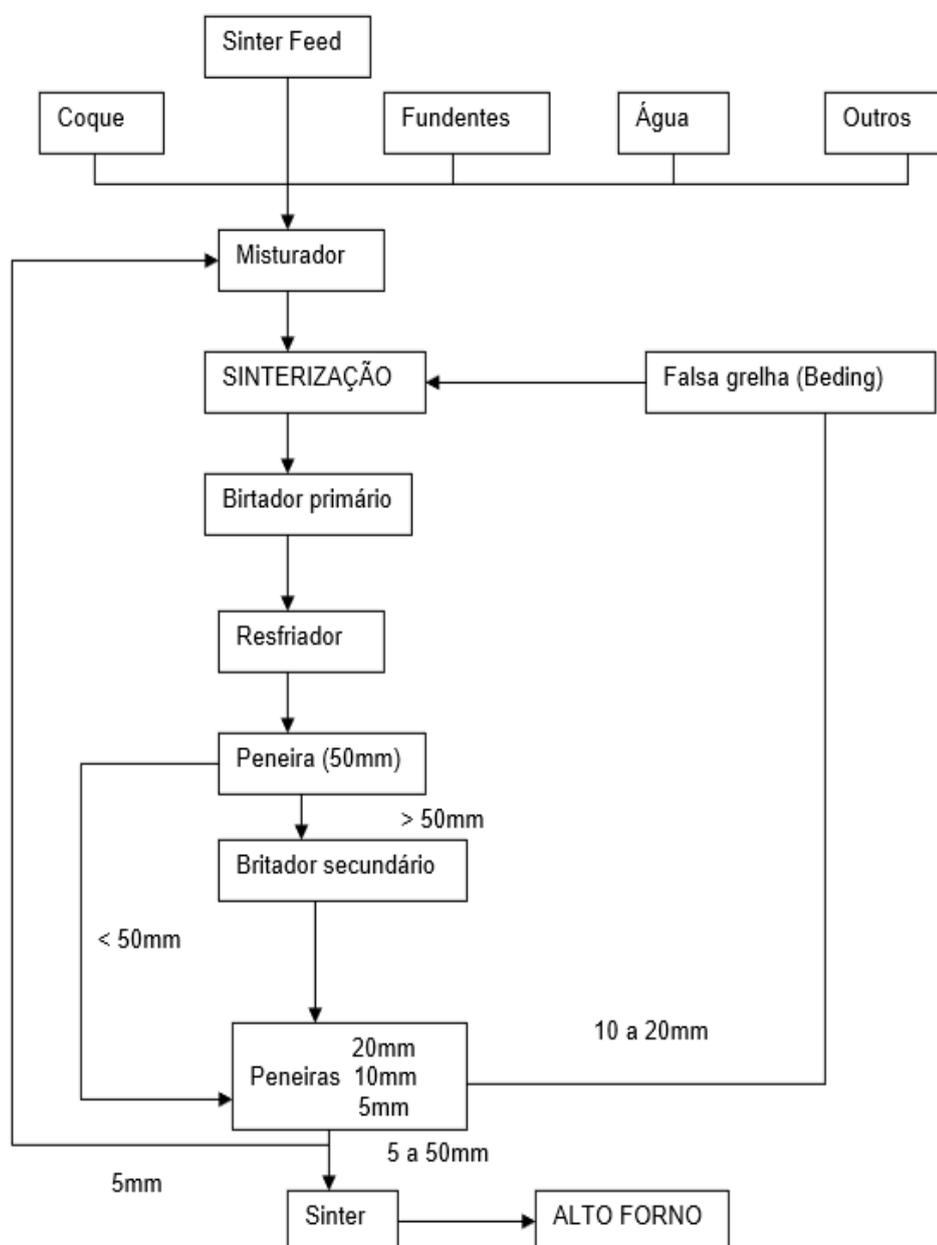
Fonte: MACHADO, 2006

Através da exaustão do ar, o vapor caminha para 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. Trazendo a queima do coque e iniciando a reação exotérmica, caracteriza-se dessa forma uma zona conhecida como “de reação” onde ocorre um forte desprendimento de calor e onde a temperatura atinge 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 fechando o ciclo de reações químicas e encaminhando 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. (TAKEHARA, 2004)

- 8) Britagem e peneiramento da massa de sínter para classificação granulométrica com intervalo de 5 a 50mm do sínter garante a futura característica de permeabilidade da carga buscando frações homogêneas. No caso de sínter não homogêneo, as partículas maiores denotam maior fragilidade pela ineficiência da sinterização. Os aglomerados de sínter com granulometria de 10 a 20mm, formam a falsa grelha (bedding) e os menores que 5mm retornam ao processo, como finos degradados, para preparação de nova mistura.

Analogamente ao destino aciaria, o fluxo da Figura 18 resume o processo de sinterização demonstrando as atividades primárias e secundárias para garantir a granulometria do sínter.

Figura 18 – Fluxograma de uma sinterização.



Fonte: MACHADO, 2006

2.4.6.2. Fundentes para a Sinterização

A finalidade dos fundentes repousa sobre a necessidade básica de segregar e escorificar as impurezas constituintes no conjunto composto pelos minérios (carga metálica) e pelo combustível sólido, encaminhando a formação de uma matriz de

escória com características voltadas para a coesão dos grãos de minério, proporcionando ao sinter um patamar de resistência adequado a utilização no alto forno (Honorato, 2005).

Os fundentes são classificados em:

- Perfil Básico: preponderantemente de CaO e/ou MgO.
- Perfil Ácido: preponderantemente de SiO₂ e/ou Al₂O₃.

Na medida em que a ganga dos minérios tenha natureza ácida ou básica, encaminha-se utilizar respectivamente fundentes ácido ou básico, no qual, produz-se um sinter de basicidade compatível ao ritmo da operação no alto forno.

No processo de sinterização são utilizados os elementos calcário, cal, serpentinito, dunito, dolomita e quartzito (areia), como os principais fundentes.

A importância da apropriada adequação granulométrica do principal fundente, o calcário, na estrutura do sinter é representada no trabalho de (OYAMA N. et al, 2005). Apresentando ganhos significativos nas propriedades metalúrgicas do produto.

Nas sinterizações o MgO é utilizado como fonte, habitualmente usam silicatos de magnésio, olivina (dunito) ou serpentinito, o que classifica cada elemento é a forma em que o último silicato está hidratado, Mg₆Si₄(OH)₈ (MUKHERJEE. et al, 1995).

A dolomita é outro elemento usado como fonte de MgO, considerado um carbonato de magnésio, possui baixa reatividade e demanda altas taxas de energia para decomposição desses compostos (NATAL et al, 1995). A melhora nas propriedades a temperaturas elevadas dos sínteres ocorre pela elevação do teor de MgO. O MgO aumenta a temperatura de fusão das escórias com altos teores de FeO (PIMENTA et al, 2002).

Esses autores expõem que, o acréscimo de MgO é menos eficaz para os sínteres do que para as pelotas, por conterem baixa reatividade na matriz de sinterização dos elementos fontes de MgO, como a dolomita e o serpentinito.

2.4.6.3. Combustíveis para Sinterização

Para que ocorra o processo de sinterização o combustível utilizado deve ter alto nível calorífico, sendo empregado geralmente na moinha de coque.

A granulometria adequada para coque está na faixa de 0,5mm a 3,36mm, essa condição mantém as velocidades de processo e tempos apropriados a queima (TAKEHARA, 2004).

Ainda em relação a granulometria do coque, outra questão a ser relevada é a formação dos poros no sínter, considerando que são formados por vazios na mistura a proporção que ocorre a queima do combustível.

Combustível é um material que se queima sob condições próprias, em contato com o ar, gerando calor (HONORATO, 2005). Geralmente dois combustíveis são utilizados na sinterização, com diferentes propósitos.

- **COMBUSTÍVEL SÓLIDO** (Coque Metalúrgico, Coque de Petróleo, Antracito e Carvão Vegetal): Parte integrante do leito de sinterização, tem por finalidade queimar-se em presença de ar, fornecendo o calor necessário ao processo.
- **COMBUSTÍVEL GASOSO** (Gás de Coqueria, Alto Forno ou Natural) **OU LÍQUIDO** (Óleo): É queimado no forno de ignição, com excesso de ar, para acender o combustível sólido contido na mistura, desencadeando o processo de sinterização.

O combustível sólido faz parte da mistura de sinterização e, além de gerar o calor necessário à aglomeração, tem por finalidade promover uma permeabilidade controlada no seio da mistura, em estado de semi-fusão, deixando vários (poros) à medida que se queima. (SUGAWARA, 1981)

O coque é o combustível mais usado em sinterização. Primeiramente porque possui todas as características físicas e químicas desejadas; em segundo lugar, porque, com seu uso, são aproveitados os finos de coque fora da especificação granulométrica para os altos fornos. Nas usinas que operam com alto fornos a carvão vegetal, os finos desse combustível são usados nas sinterizações. O antracito, pode ser usado na sinterização com resultados bastantes aceitáveis. Nas usinas brasileiras o uso do antracito também já está consagrado.

Tal fato se deve à sua boa performance quando usado nas proporções de até 50% e a busca constante das siderúrgicas em elevar o rendimento coque enornado /carvão, gerando déficits de coque fino, cada vez maiores, nas sinterizações. (HONORATO, 2005)

O carvão vegetal ou coque é substituído parcialmente pelo coque de petróleo, este apresenta bons resultados desde que haja controle de emissão de SO_x quando do uso desse combustível sólido.

Independentemente do tipo considerado, em linhas gerais, o combustível para sinterização deve possuir elevado poder calorífico, reatividade média, granulometria e composição química adequadas.

Em relação a composição química, o teor de carbono é o principal fator de controle, que deve ser o máximo. Para os elementos antracito, coque fino e coque de petróleo, o enxofre deve ser conferido, já que os gases formados são extremamente prejudiciais a saúde humana por serem corrosivos e tóxicos e também para os equipamentos de exaustão.

O coque breeze, também conhecido como fino de coque, geralmente é usado como combustível nas plantas de sinterização convencionais. Contudo, há sobra de moinha de carvão nos altos fornos de carvão vegetal, isto é, finos de carvão inferiores a 9mm, onde pode ocorrer a substituição do coque breeze como combustível. Entretanto, existe diferença entre a reatividade do coque e do carvão vegetal, podendo ocorrer alteração na qualidade e produtividade no processo de sinterização (LOVEL et al., 2009).

No que tange a qualidade do sínter, a resistência a frio é acometida pela reação do combustível. A resistência do sínter diminui a partir do momento em que a reação do combustível aumenta (LOVEL et al., 2009).

2.4.6.4 Qualidade do Sínter

O sínter para ser considerado de boa qualidade, deve possuir as seguintes características: mínimo de enxofre e ferro, conter mais de 60% de ferro, resistência a temperaturas elevadas e aos esforços no interior do forno sem amolecer e boa resistência mecânica. Propriedades físicas e químicas também são utilizadas para

definis a qualidade do sinter, essas podem ser observadas 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

2.4.6.5. Resistência mecânica

Para que ocorra o tratamento mecânico do sinter, a granulometria tem que está adequada através da britagem e peneiramento para que haja a distribuição granulométrica, ajustada as exigências dos altos fornos (Honorato 2005). Essa distribuição granulométrica ocorre entre 5,0mm a 40,0mm de diâmetro de partículas de sinter, com média de 20mm em seu tamanho.

Geralmente, esta classificação granulométrica encontra-se na faixa de 5,0mm a 40,0mm de diâmetro de material particulado de sinter, com um tamanho aproximado de 20mm. A frequência operacional e os equipamentos variam conforme as características e disponibilidade de layout das empresas.

A alta resistência mecânica a abrasão e queda, está entre os atributos para um sinter de qualidade, podendo ser comprovado pelos testes de Shatter e Tumbler.

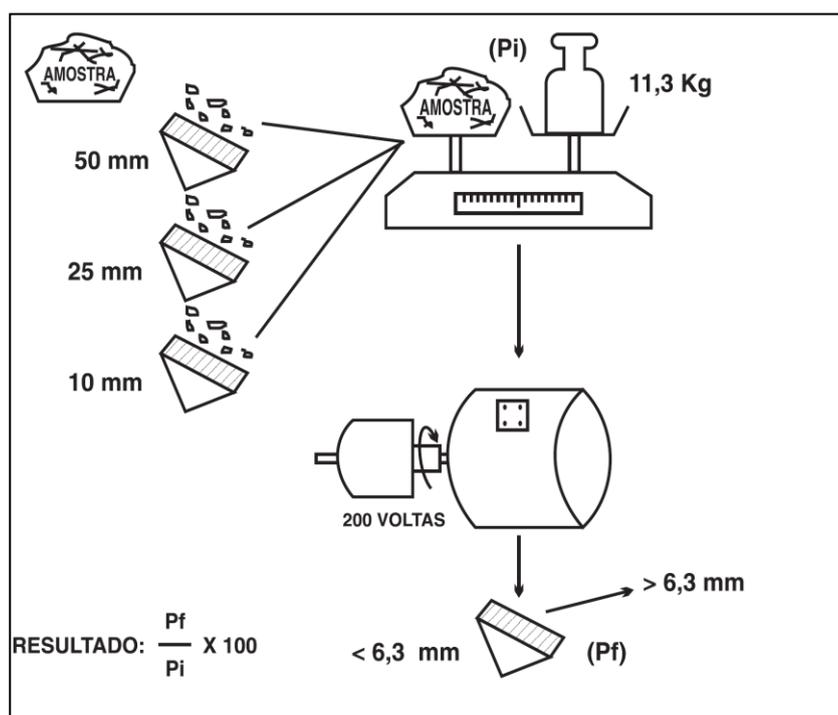
2.4.6.6. Tumbler Test

A função do Tumbler Test é medir a resistência do material à abrasão, após sofrer atrito com as paredes do alto forno e à própria carga (HONORATO 2005). Esse processo de decomposição atinge de modo direto a produção, pois, a permeabilidade da carga no forno é prejudicada.

Baseado na norma JIS M 8712, o processo Tumbler Test tem como procedimentos operacionais fundamentais (HONORATO, 2005):

- Determinar a distribuição granulométrica no material nas malhas de (6,3; 10; 25 e 50mm) para minérios e (10; 25 e 50mm) para sínter;
- Compor uma amostra de 11,3kg (Pi) para minério e 23kg para sínter, segundo a distribuição granulométrica encontrada;
- Depositar a amostra em um tambor rotativo e a submeter a 200 voltas consecutivas;
- Peneirar o material em malha de 6,3mm para minério e 10mm para sínter, tomando-se o peso do retido (Pf).

Figura 19 - Esquema representativo do Tumbler Test



Fonte: JIS M 8712

Após a realização dos procedimentos operacionais descritos por (HONORATO, 2005), realiza-se a aplicação da fórmula e a aprovação se dá de acordo com os seguintes parâmetros:

- + 6,3 mm \geq 75% para o minério;
- + 6,3 mm \geq 60% para sinter.

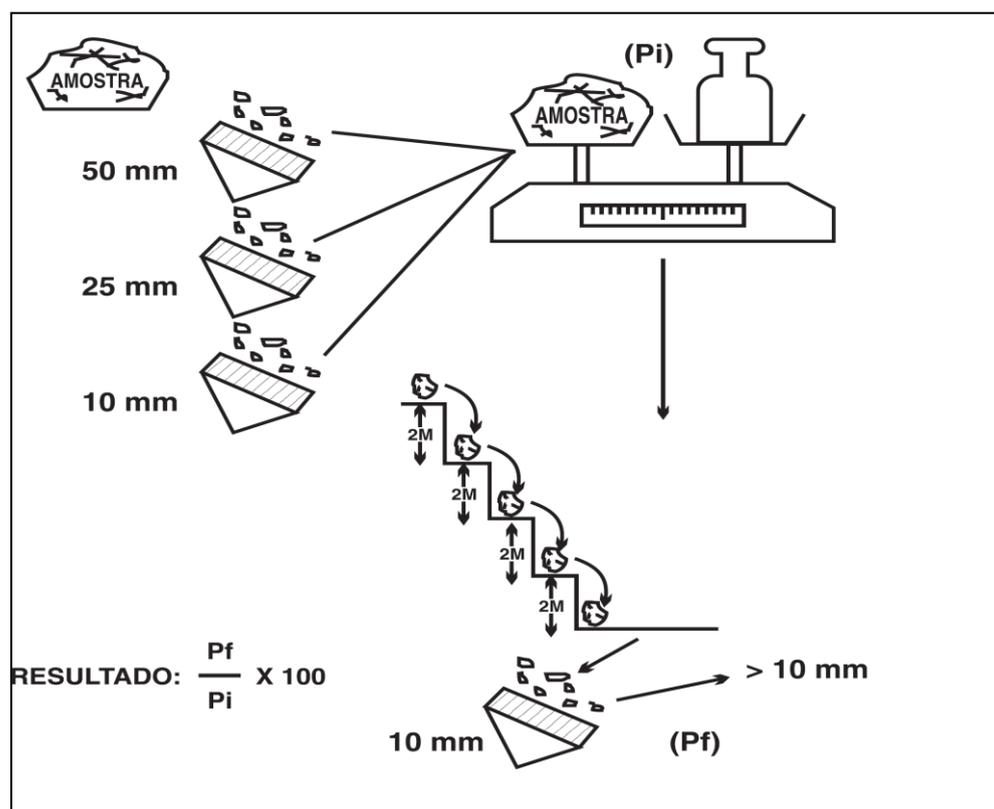
2.4.6.7. Shatter test

A função do Shatter Test é de mensurar a maior ou menor fragilidade na produção de materiais finos após serem submetidos a quedas durante o abastecimento no alto forno. Afetando a produção, pois, prejudica a permeabilidade do material a ser produzido (HONORATO, 2005).

Para a determinação da resistência mecânica do sinter, a baixa temperatura, é realizado o Shatter Test. Visto que a degradação do sinter ocorre no movimento de carregamento até o topo do alto forno, é necessário que faça o teste de análise de distribuição granulométrica antes e após a degradação forçada do sinter (LOPES, 2012).

Baseado na norma JIS M 8711, o processo Shatter Test tem como procedimentos operacionais fundamentais (HONORATO, 2005):

- Determinar a distribuição granulométrica do material, nas malhas de 10, 25 e 50mm;
- Compor uma amostra de 30kg (Pi) para minério de ferro e 20 kg (Pi) para o sinter, segundo a distribuição granulométrica encontrada;
- Submeter a amostra a quatro quedas sucessivas de 2m de altura;
- Peneirar o material em malha de 10mm, tomando-se o peso do retido (Pf).

Figura 20 - Esquema representativo do *Shatter Test*.

Fonte: JIS M 8712 *apud* HONORATO 2005.

Após a realização dos procedimentos operacionais descritos por HONORATO (2005), realiza-se a aplicação da fórmula e a aprovação se dá de acordo com os seguintes parâmetros:

- + 10 mm \geq 92% para o minério de ferro
- + 10 mm \geq 89% para sinter.

2.4.6.8. Características básicas de Minério de Ferro utilizado em Sinterização

A qualidade requerida em minérios de ferro, se baseia na composição química, características físicas e metalúrgicas, que estão intimamente relacionadas aos requisitos do processo de sinterização.

A produção de sinteres de minério de ferro que garantam adequadas qualidade química, física e metalúrgica e que assegurem elevados níveis de produtividade está diretamente ligada à qualidade dos minérios de ferro empregados na mistura de partida a ser sinterizada. Estes minérios são usualmente avaliados considerando sua composição química e sua distribuição granulométrica. A grande dificuldade na obtenção de um único tipo de minério com qualidade assegurada, em quantidades suficientes e custos compatíveis com a matriz programada, encaminha a utilização de uma mistura de tipos de minérios, na qual, um ou dois minérios são considerados base da mistura e outros tipos são adicionados para correção e equilíbrio da mistura.

A estrutura da composição química e distribuição granulométrica dos minérios de ferro não é, de toda forma, suficiente para assegurar a obtenção de índices de produtividade no processo, nem de garantir qualidade do produto sinterizado. Características abrangentes que envolvem aspectos estruturais, de textura e mineralógicos, embora de relevante importância, ficam relegados a baixa prioridade, sendo dessa forma, pouco explorados na seleção do rol de minérios voltados para a sinterização. Cabe, portanto, ressaltar que, a avaliação dos minérios em plantas piloto de sinterização se mostra como ferramenta relevante voltada para a definição da mistura de minérios mais adequada e vantajosa, levando também em conta, as questões comerciais, estratégicas de mercado e de logística de abastecimento.

2.4.6.9. Conjunto das Características Químicas

A grande importância que se atribui à composição química do minério de ferro é, varia segundo a ótica de cada usuário, a faixa de variação de cada requisito pode se estabelecer de forma bem ampla. Seu estabelecimento depende fundamentalmente do balanço de carga metálica para o Alto Forno, o ponto de partida para o conjunto de definições tem como base o percentual projetado de sinter na composição da carga, do tipo e do volume esperado da escória a ser produzida na produção de gusa e, fundamentalmente, da qualidade requerida para o sinter e para o gusa. Por outro lado, é fundamental que, uma vez especificada a composição química requerida para minério, a sua consistência seja garantida com repetitividade para o efetivo controle de qualidade para o sinter.

A possibilidade de diversificação dos minérios de ferro para sinterização, o emprego de um eficiente sistema de dosagem e de homogeneização da mistura e a disponibilidade de área para a estocagem de pulmões desses minérios em grandes pátios auxiliam a garantia de maior efetividade no controle da composição química do produto e, pode inclusive, absorver variações das características físicas e químicas dos constituintes da mistura.

Em geral, as limitações mais comuns de natureza química para os minérios de ferro, no caso das reservas brasileiras, nas quais despontam minérios ricos, com reduzidos teores de enxofre, titânio e álcalis, resumem-se aos teores de alumina, sílica e fósforo, e em casos muito específicos na busca de teores baixos de manganês.

O foco, na fixação de limites de controle quantitativo para a sílica, fica estabelecido em função do volume de escória projetado para o gusa e da necessidade de menores desvios-padrão de basicidade. Outra meta primária se estabelece em função de requerer também evitar o emprego de minérios onde o SiO_2 esteja mais concentrado.

Uma das principais restrições a alta concentração de Al_2O_3 na mistura de minérios está vinculada à sua distribuição nas várias faixas granulométricas. Resultados qualitativos e quantitativos revelam que estas concentrações exercem influência negativa no índice de degradação sob redução (RDI) no sinter. Fato similar decorre da dissolução do titânio na rede da hematita. O TiO_2 , dessa forma, apresenta o comportamento assemelhado ao do Al_2O_3 considerando à degradação sob redução.

Quando se avaliam os elementos minoritários presentes nos minérios de ferro brasileiros, a relevante restrição se verifica quanto à concentração de fósforo, em função da dificuldade da eliminação por intermédio da escória do alto forno, o que limita em muitos casos, a produção de aços com qualificação superior.

2.4.6.10. Características Físicas

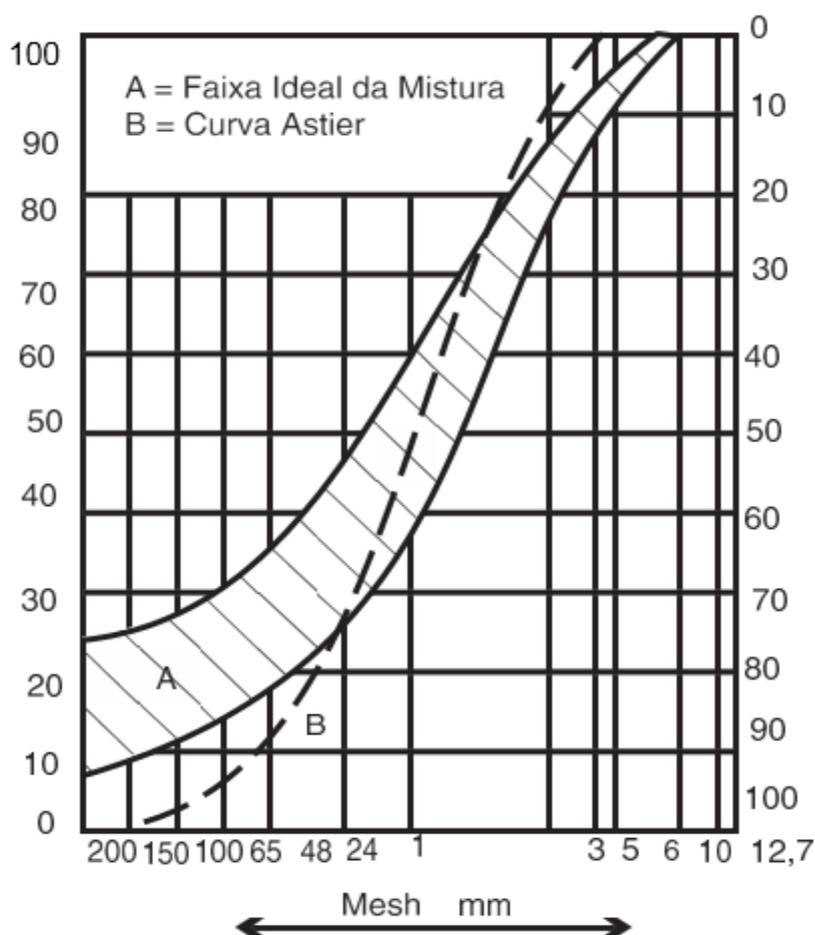
O minério de ferro utilizado para produção de sinter possui características físicas distintas, como a granulometria, presença de água combinada e o poder de

aglomeração a frio. Existem outras características, porém, que são de pouca importância pela falta de informação a respeito de seus métodos e eficácia, são elas: forma de grão, porosidade, densidade, etc.

Essas características agem diretamente no desenvolvimento do processo, pois influenciam na capacidade de aglomeração e frio da mistura.

No processo de sinterização, o minério de ferro distribuído granulométricamente de forma ideal é definido pela curva de Astier, onde determina-se que a granulometria deve ser limitada pelas malhas de 6,35mm e 150mesh (0,150mm) com cerca de 50% do material acima de 1 mm. Para trabalhar com um maior número de minérios e desenvolvimento de técnicas na preparação de misturas para produção de sinter.

Figura 21 – Distribuição granulométrica ideal para a mistura de minérios (curva de Astier)

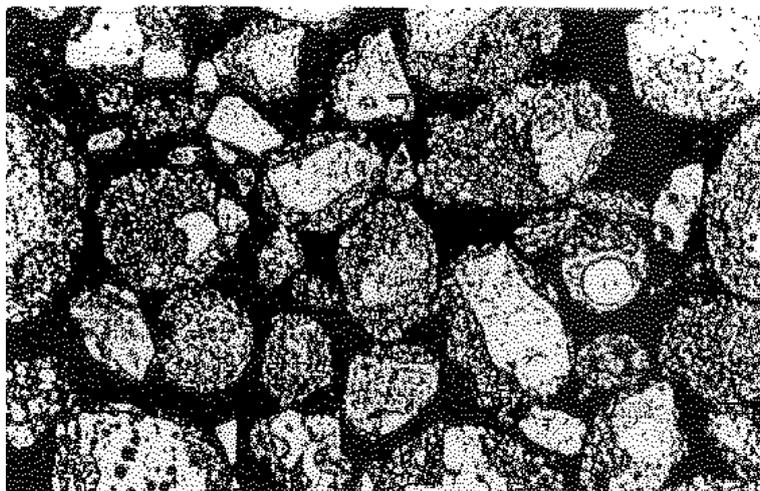


Fonte: Honorato, 2005

Nos minérios hematíticos que formam as misturas, é observado a presença de uma ligação entre a produtividade da sinterização e a granulometria, respeitando os limites de resistência mecânica do sínter. Já no caso de minérios hidratados, essa ligação não é observada, apesar de a permeabilidade a frio da mistura ser mais elevada para a granulometria.

Poder de Aglomeração a Frio (p.a.f) compreende-se por sua capacidade em formar micropelotas ou grânulos, na medida em que são providos de umidade, os finos de minério e os constituintes são submetidos a uma etapa de mistura e micropelotização, onde na segunda fase, atomiza-se água com intuito de auxiliar na promoção da micropelotização. Esta é uma propriedade bastante interessante nos minérios por inúmeros motivos, entre eles desponta o aumento de produção e a melhor qualidade do produto. A Figura 22 apresenta o aspecto de micropelotas em mistura de sinterização embutida a frio em resina.

Figura 22 – Fotomicrografia de micropelotas em mistura a sinterizar



2.4.6.11. Resistência a Frio do Sínter

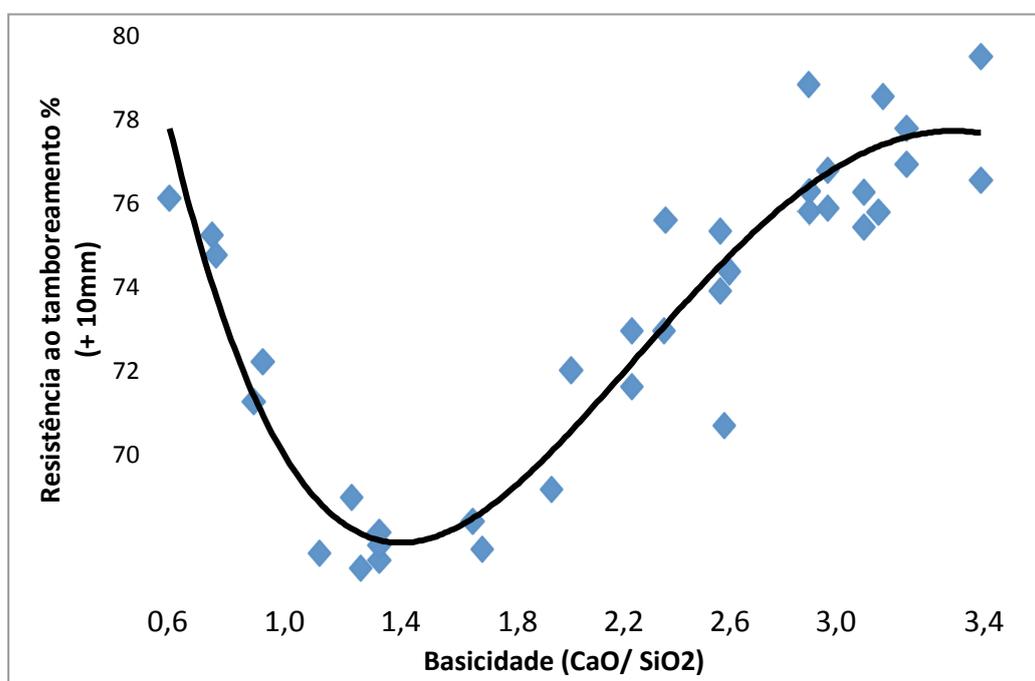
A resistência a frio do sínter decorre, de forma primária, da resistência de cada componente mineral, da resistência do agente aglomerante e da composição da base mineral (DAWSAN, 1993). Estudos sobre a tenacidade a fratura de várias fases minerais encaminharam uma proposição de ordem de queda na resistência designada para o sínter.

A resistência do produto, pode também ser afetada de forma relevante a partir da adição de MgO, sua tendência é diminuir com aumento da fração de MgO.

A basicidade do sinter afeta de forma consistente a resistência à frio (Fedorenko, 1970) avaliaram a variação da resistência à frio com a variação da basicidade entre 0,6 e 3,4. Nos estudos foi avaliado que, partindo-se de uma basicidade da carga igual a 0,6, a resistência a frio do sinter reduz na medida do aumento da basicidade até se atingir um valor mínimo na basicidade de 1,4. A partir deste patamar, a resistência volta a crescer de forma acentuada.

|||||

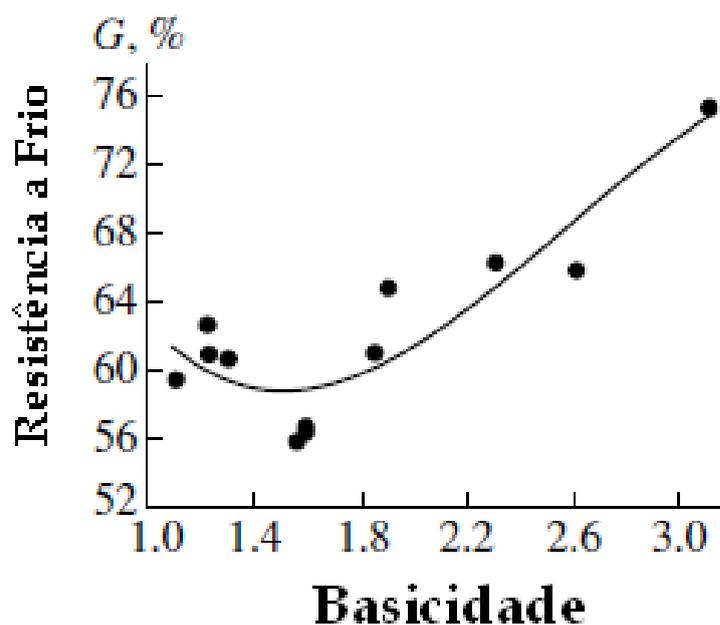
Figura 23 – Influência da basicidade na resistência do sinter



Fonte: FEDORENKO *et al.*, 1970

De outra forma, (MALYSHEVA 2007), também avaliaram o comportamento peculiar da resistência a frio do sinter, ao se comparar os estudos e o resultado obtido por (FEDORENKO, 1970), observa-se que os resultados são bastantes semelhantes, entretanto, (MALYSHEVA, 2007), aponta uma resistência mínima para o sinter no patamar de basicidade de 1,6.

Figura 24 – Influência da basicidade na resistência a frio do sínter



Fonte: MALYSHEVA *et al.*, 2007

2.5 Laterita

A laterização é um processo de alteração das rochas, característico das regiões tropicais de clima úmido acarretando a lixiviação de minerais primários e o enriquecimento do solo em hidróxidos de ferro e alumínio, acompanhados de outros elementos como óxido de titânio, manganês, etc. (VIEIRA, 2007). As formações que se acumulam em grande quantidade geram camadas de resistência ferruginosas e aluminosas por sofrerem o processo de lixiviação, o excesso de chuvas e irrigação formam uma crosta constituída por nutrientes do solo, como Fe e Al (SUAREZ, 2008). Como mostra a Figura 25.

Figura 25: Solo em processo de Laterização



Fonte: TEIXEIRA, 2000

A denominação “laterita” tem sido empregada para designar depósitos residuais de óxido de ferro hidratado, associado geralmente com alumina e sílica, decorrente do processo de laterização (AMARAL, 2004).

Esses materiais são oriundos do intemperismo de rochas e materiais superficiais em alteração, situados em posições variadas do relevo regional em regiões tropicais com excesso de chuvas e temperaturas mais baixa máxima acima de 18°C e a temperatura média superior a 24°C que também sofrem irrigação e intemperismo químico. (EPINDOLA, 2008). Sua composição varia de acordo com a rocha de origem e o grau de decomposição sofrido pela rocha (OLIVEIRA, 2008).

Figura 26: Laterita



Fonte: TEIXEIRA, 2000

Além de ser considerada como um tipo de intemperismo, a laterização dos solos é também entendida como um processo pedogenético, ou seja, que está relacionado com a dinâmica de formação e transformação do solo (AMARAL, 2004). Os solos formados a partir do processo de laterização possuem uma coloração amarela, vermelha e também marrom alaranjada, o que não significa que todos os solos nessa coloração provêm desse tipo de processo. Abaixo a Figura 27 exemplificam os diferentes tipos de coloração.

Figura 27: Coloração do Solo Laterítico

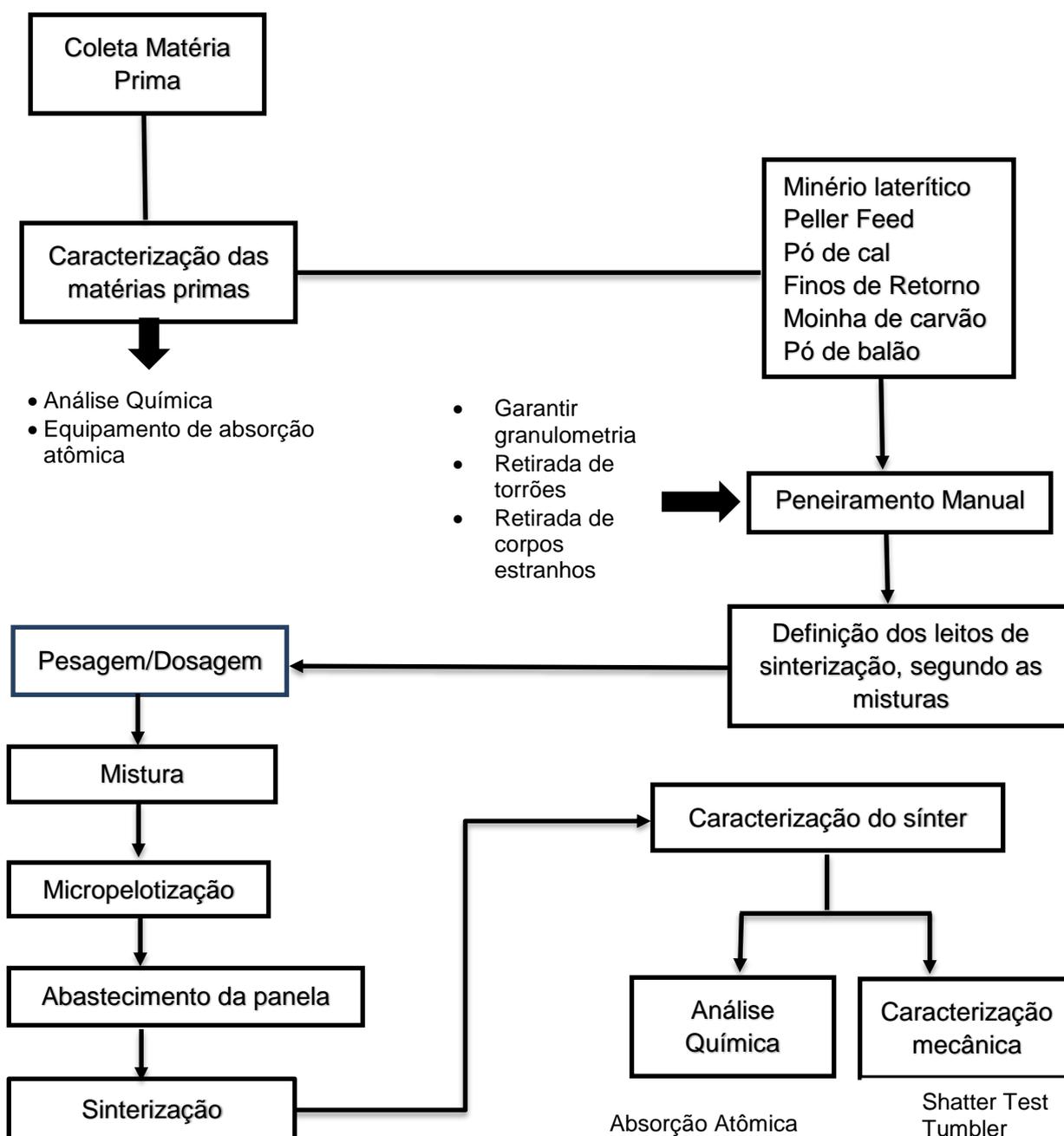


Fonte: AMARAL, 2004

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia estruturada para a realização deste trabalho baseou-se no planejamento e execução de etapas de obtenção de materiais de partida, seu processamento em planta piloto de sinterização e a caracterização química e mecânica dos produtos obtidos, variando-se as misturas de materiais com vistas a síntese de sínter a partir de minério de ferro, com características morfológicas Laterística, pellet feed e insumos disponíveis para o processo e obtenção do produto (sínter). Conforme esquema representado na Figura 28.

Figura 28 – Fluxograma Geral da Metodologia



3.1. Materiais

As amostras das matérias primas utilizadas no desenvolvimento dos testes foram obtidos a partir da coleta em pilhas de estoque de matérias primas e de rejeitos em uma usina siderúrgica na região de Matozinho – MG. Com objetivo de buscar uma mistura mais equilibrada de insumos, foram propostas cinco misturas de materiais e realizados três testes de sinterização com cada tipo de mistura, sendo que foram assumidos os valores médios de composições de partida e resultados para os testes de cada mistura.

Na composição ponderada de cada mistura foram utilizados componentes secos, desagregados e sem contaminação de óleo. Nas misturas escolhidas foram adicionados os componentes abaixo, como matéria-prima complementar, juntando-se ao minério de ferro laterítico e ao pellet feed.

Componentes Complementares:

- Moinha de carvão;
- Pó de coletor (Pó de Balão);
- Finos de Retorno (Finos Degradados);
- Pó de Cal.

Na Tabela 4 estão listadas as características químicas dos componentes da matéria-prima, os ensaios foram realizados nos laboratórios da NOMOS no Rio de Janeiro. Foi realizado ensaio com digestão em ácidos fortes com leitura em equipamento de absorção atômica. Para a retirada das amostras representativas da matéria-prima, foram selecionadas dez amostras parciais de cada componente, removendo duas partes diagonais, incluindo o material fino.

Tabela 4 – Características químicas dos componentes da matéria prima

Amostras	%								
	FeO	Fe	SiO2	Al2O3	MgO	P	CaO	TiO2	Mn
Pellet Feed	-	64,1	2,38	1,73	0,11	0,07	1,35	0,08	0,11
Minério Fe Laterítico	-	62,3	8,25	5,75	0,25	0,13	2,32	0,12	0,08
Pó de Cal	-	0,7	4,5	0,65	0,03	0,1	53,01	0,03	0,05
Finos de Retorno	9,5	38,2	7,9	1,5	1,41	0,07	13,6	0,31	0,42
Pó de Balão	9,8	46,7	2,05	1,65	4,8	0,25	23,5	0,4	0,8

Fonte: Autor, 2018

Características da Moinha de Carvão

Tabela 5 – Características da moinha de carvão

Componentes	Percentual/Kg
Carbono Fixo	59,7%
Carbono Total	65,3%
Materiais Voláteis	24,2%
Cinzas	10,5%
Poder Calorífico	3.350 Kcal/Kg

Fonte: Autor, 2018

Misturas de partida e suas composições ponderadas

As misturas e suas proporções são apresentadas na Tabela 6 a seguir:

Tabela 6 – Componentes das Misturas

Componentes	Mistura 1 (%)	Mistura 2 (%)	Mistura 3 (%)	Mistura 4 (%)	Mistura 5 (%)
Minério Laterítico	30,0	30,0	32,0	40,0	40,0
Pellet Feed	30,0	30,0	30,0	20,0	10,0
Pó de Cal	9,5	9,5	6,0	5,0	5,0
Finos de Retorno	20,0	18,5	20,0	21,5	34,5
Moinha de Carvão	7,5	9,0	9,0	10,5	10,2
Pó de Balão	3,0	3,0	3,0	3,0	0

Fonte: Autor, 2018

3.2. Métodos

3.2.1 Dosagem das Misturas

3.2.1.1 Peneiramento

É realizado o peneiramento com objetivo de remover grande parte da contaminação e buscar adequação da faixa granulométrica dos componentes da matéria prima, retirando também partículas de sucata, madeira e plástico entre outros corpos estranhos

3.2.1.2 Definição do Leito de Fusão

O leito de fusão considerado para as cinco misturas a serem sinterizadas na planta piloto, buscar de forma ampla, simular a performance de esquema de distribuição ponderados dos componentes, comparando as proporções, com os resultados a serem obtidos nos ensaios de caracterização pós sinterização.

3.2.1.3 Planta Piloto de Sinterização

A planta piloto de sinterização da THI Metalurgia Ltda, fica localizada no município de Santa Luzia - MG. A pequena sinterização para testes compreende um misturador tipo tambor rotativo, um o micropelotizador tipo tambor rotativo, uma panela de sinterização e sistema de exaustão de processo acoplado a panela.

Figura 29 – Vista geral da planta piloto



Fonte: Autor, 2018

Figura 30 – Planta piloto e exaustor



Fonte: Autor, 2018

O misturador cumpre a função de homogeneizar a mistura e é composto de tambor rotativo de 2000 mm x 350 mm. O tambor é apoiado em roletes e acionado por motoredutor que usa como transmissão roletes de atrito. Pode-se variar velocidade de giro bem como inclinação do tambor, modificando-se, portanto, o tempo de residência da mistura no equipamento e a intensidade da mistura.

Figura 31 – Misturador e micropelotizador



Fonte: Autor, 2018

O micropelotizador tem como função promover uma microaglomeração de partículas para ajustar a morfologia do material antes do carregamento da panela de sinterização. Assim como o mishurador, se constitui num tambor rotativo de 2000mm x 450mm. Possui o mesmo sistema de acionamento e possibilidade de inclinação do tambor para ajustar o tempo de residência, possibilitando ajustar o diâmetro da micropelotas. Adicionalmente possui a instalação de um sistema simples de atomização da água para facilitar a aglomeração das micropartículas.

Figura 32 – Micropelotizador vista frontal



Fonte: Autor, 2018

A panela de sinterização é o equipamento onde é processada a queima da mistura, em nosso conjunto de testes, fixamos o tempo médio de sinterização em 25 minutos e para atingir esse patamar regulamos o exaustor em faixa intermediária de vazão via Danpem. A panela tem seção quadrada de 600mm x 600mm e profundidade útil de 400mm.

Figura 33 – Panela de Sinterização



Fonte: Autor, 2018

Para cada teste foram carregados 100kg de mistura na panela. Considerando-se três testes por mistura, foram testados 300kg de cada formulação, todos utilizando os mesmos parâmetros de processo

Após cada queima o produto resultante foi retirado da panela utilizando o mecanismo de basculamento acondicionador em tambor específico para resfriamento e coleta de amostras para análise química e caracterização mecânica.

Figura 34 – Panela e sistema de basculamento



Fonte: Autor, 2018

322 Caracterização Mecânica do Sínter Produzido

3.2.2.1. Shatter Test

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

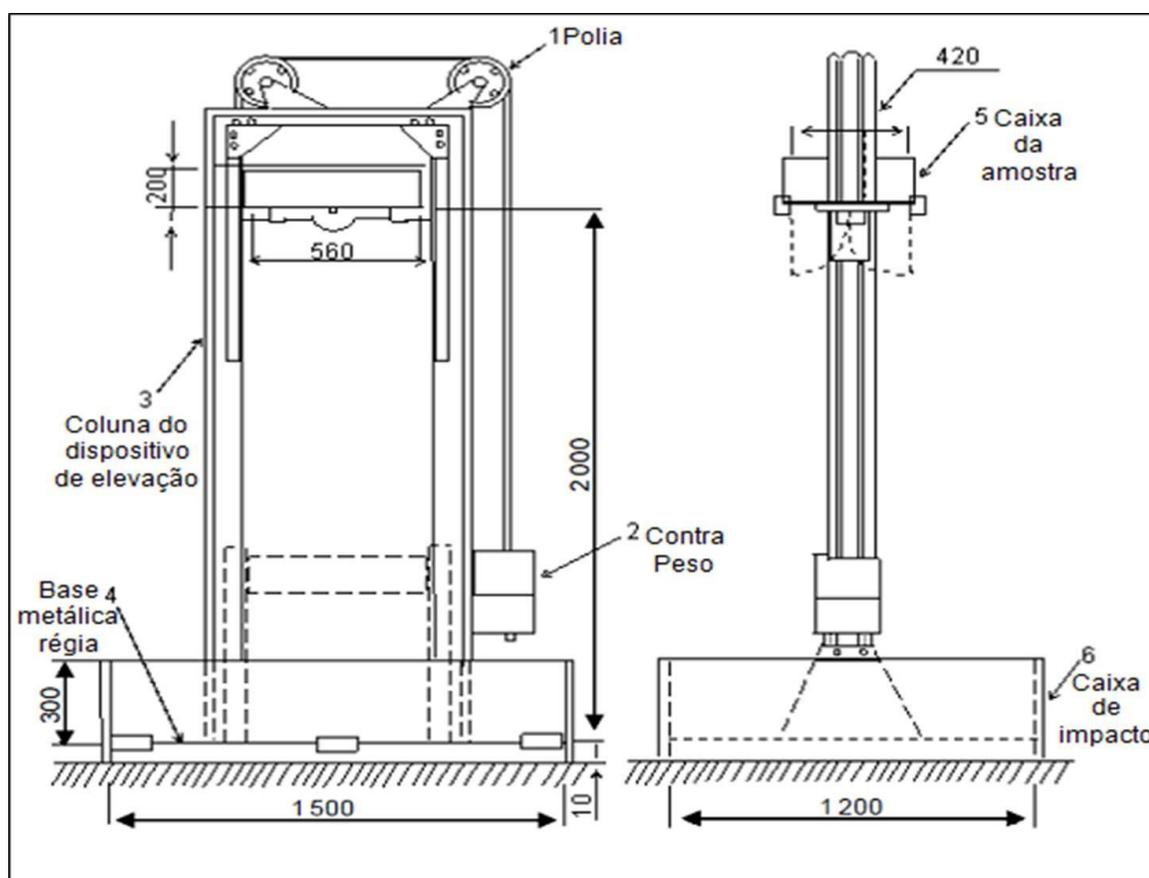
A realização do teste foi com base na norma ABNT NBR 10633 - Sínter de

minério de ferro - Determinação da resistência à queda. Cujas finalidades é englobar um dos vários métodos de ensaio que têm sido desenvolvidos para medir diversos parâmetros físicos. Dessa forma a norma especifica um método para a determinação da resistência à queda de sínters.

Na Figura 35 observa-se as características do aparelho utilizado para a realização do Shatter test. E logo após foram descritos os procedimentos, materiais e aparelhagem utilizados na realização do mesmo, tais como:

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

Figura 35 - Características do aparelho utilizado no Shatter Test.



Fonte: Adaptado da NBR ABNT 10633.

- **Caixa de impacto:** com 1500 mm de comprimento, 1200 mm de largura e 300 mm de altura, confeccionada em chapa metálica rígida, com espessura mínima de 10 mm. Uma das laterais é articulada para possibilitar a retirada de material após cada queda. A base da caixa é substituída quando sua espessura é reduzida em 3 mm, em qualquer ponto de impacto na queda da porção de ensaio;
- **Dispositivo de elevação:** constituído de coluna, polias e contrapeso, para a elevação e o abaixamento da caixa de amostra a uma altura mínima de 2 m, medida entre o fundo da caixa da amostra e a caixa de impacto;
- **Dispositivo de pesagem:** capaz de pesar a massa a ser determinada com uma sensibilidade de 1/1000;
- **Peneiras:** com aberturas quadradas de 50 mm, 38 mm, 25 mm e 9,5 mm, conforme ABNT NBR ISO 3310-1.

Na Figura 36, temos a representação do aparelho utilizado para a realização do Shatter test. Suas principais características foram explanadas acima.

Figura 36 - Aparelho utilizado no ensaio de queda.

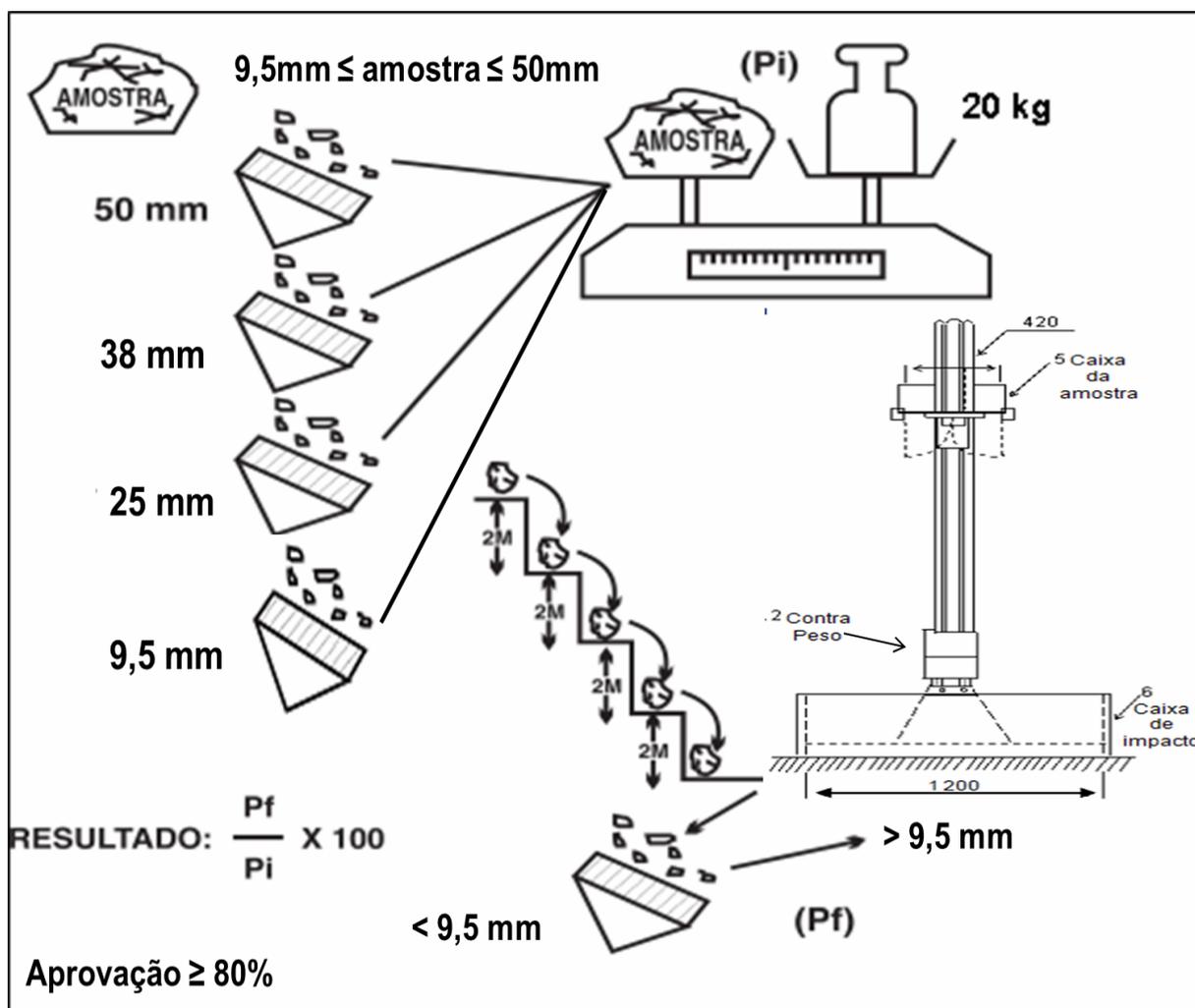


Fonte: Minas Logística, 2016.

Na Figura 37 observa-se a descrição das principais etapas para a realização do shatter test, tais como: Amostragem, preparação da amostra, porções de ensaio e procedimentos operacionais realizados, tais como:

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

Figura 37 - Esquema para a realização do Shatter Test



- Determinou-se a distribuição granulométrica do material de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4701. Para tal foi realizado o peneiramento da amostra de ensaio seca nas peneiras de abertura 50 mm, 38 mm, 25 mm e 9,5 mm e foram desprezados o material acima de 50 mm e abaixo de 9,5 mm;
- Pesou-se cada fração e foram compostas quatro porções de ensaio, de 20 kg
- $\pm 0,2$ kg cada, na faixa granulométrica de 9,5 mm a 50 mm, proporcionalmente à distribuição granulométrica encontrada;
- Tomou-se uma das porções de ensaio de 20 kg preparadas anteriormente em amostras e anotou-se sua massa (P_i);
- Colocou-se a porção de ensaio na caixa de amostra, nivelando sua superfície;
- Elevou-se a caixa até a altura de 2 000 mm;
- Abriu-se rapidamente o fundo da caixa para que toda a porção de ensaio caísse de uma só vez sobre a caixa de impacto;
- Todo o material foi recolhido;
- Os passos anteriores foram repetidos por mais três vezes e a porção de ensaio recolhida foi peneirada na peneira de abertura de 9,5 mm, de acordo com a ABNT NBR ISO 4701;
- O Índice de resistência à queda (IQ) foi expresso como a razão percentual entre a massa da fração retida na peneira de 9,5 mm denominada peso final (P_f) e a massa inicial da porção de ensaio (P_i).
- O resultado do Shatter test é adequado quando o percentual obtido é maior ou igual a 80%, ou seja, o índice de resistência a queda tem que ser $\geq 80\%$;
- Quando o índice de resistência a queda é $\geq 80\%$ o teste deve ser repetido somente duas vezes. Se o índice for $< 80\%$ são necessárias 3 repetições.

3.2.2.2. Tumbler Test

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

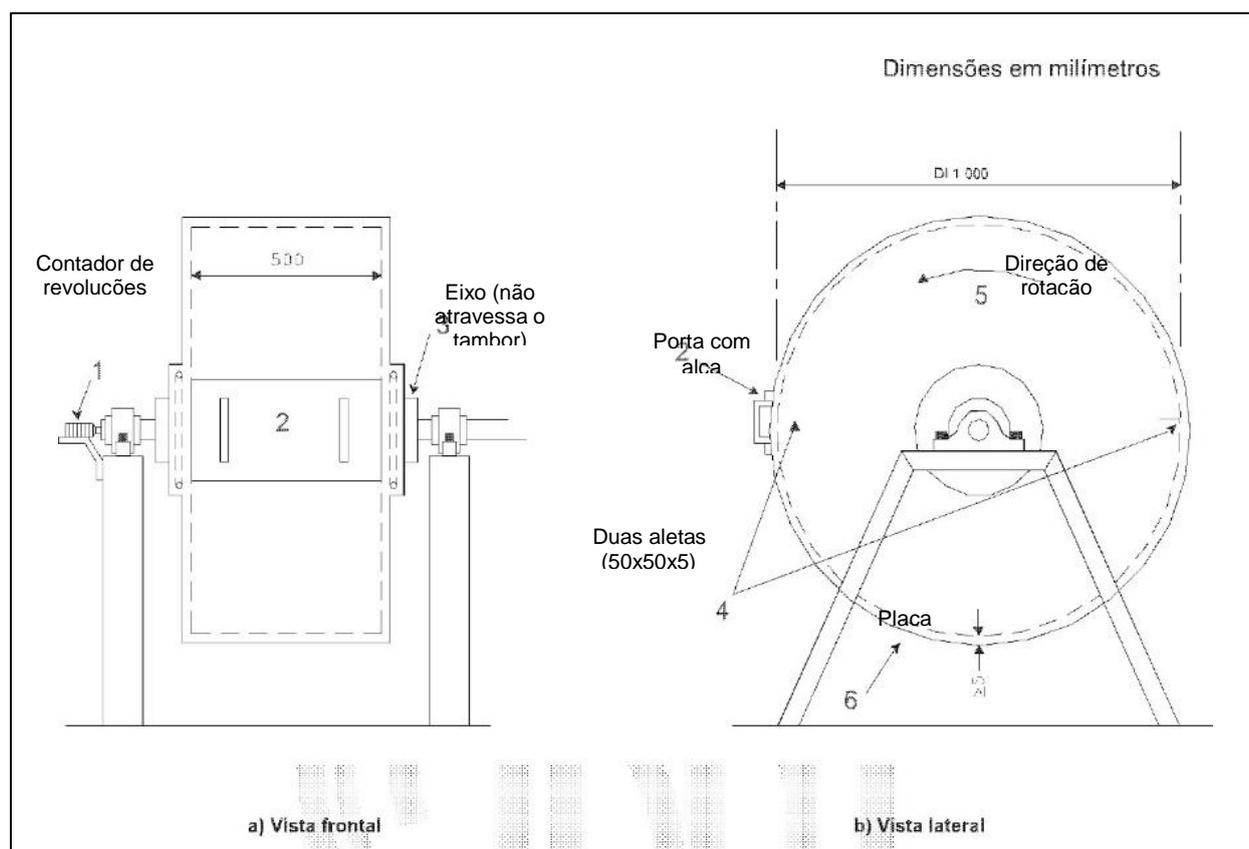
O objetivo do teste foi avaliar a degradação do material ao longo do processo, o quanto o sinter ficou quebradiço e perdeu na forma de fino. Pois esta degradação prejudica a permeabilidade da carga no alto forno, diminuindo assim a produtividade do processo.

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

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

Na Figura 38 observa-se as características do aparelho utilizado para a realização do tumbler test. E logo após foram descritos os procedimentos, materiais e aparelhagem utilizados na realização do mesmo.

Figura 38: Características do aparelho utilizado no Tumbler Test.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR ISO 3271

- **Tambor:** fabricado com placa de aço com espessura mínima de 5 mm, com diâmetro interno de 1000 mm e comprimento interno de 500 mm. Duas aletas de aço igualmente espaçadas e com formato em L, com superfície horizontal de 50 mm x altura de 50 mm x espessura de 5 mm e comprimento de 500 mm solidamente montadas no sentido longitudinal, dentro do tambor, por soldagem. Cada aleta foi fixada de forma que apontasse para o eixo do tambor, com sua perna de fixação apontando na direção oposta à da rotação, proporcionando assim uma saliência livre e desobstruída para levantar a amostra. A porta foi construída de forma a se encaixar na abertura do tambor, formando uma superfície interna lisa.
- **Equipamento de acionamento do tambor:** capaz de assegurar que o tambor atinja velocidade plena em uma revolução, gire a uma velocidade constante de 25 r/min e pare em uma revolução. O

equipamento tem um contador de revoluções e um dispositivo de parada após um número predeterminado de revoluções;

Na Figura 39 temos a representação do aparelho utilizado para a realização do tumbler test.

Figura 39 - Aparelho utilizado no ensaio do tumbler test

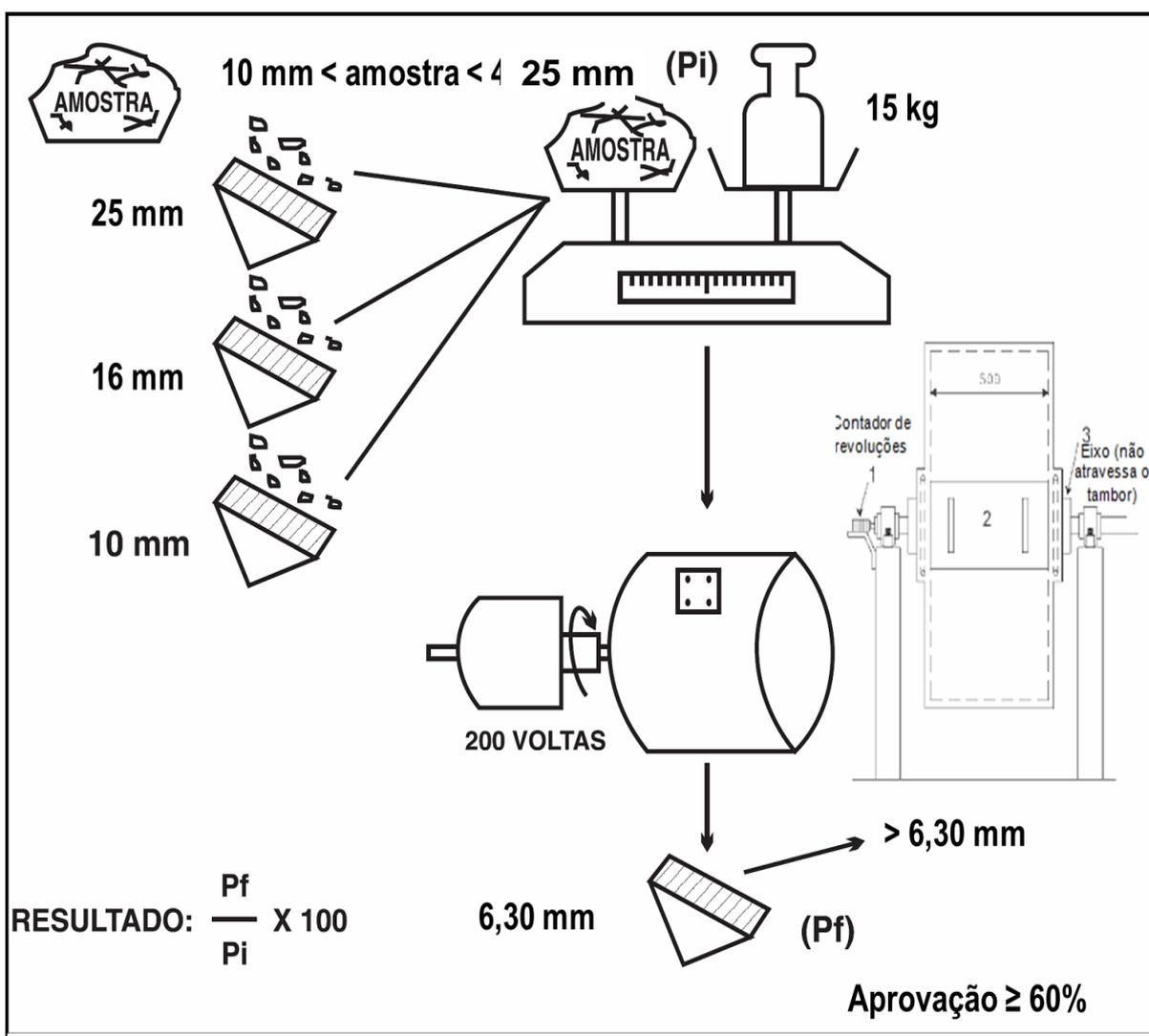


Fonte: Minas Logística, 2016

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

Na Figura 40 podemos observar a relação das principais etapas para a realização do tumbler test, tais como: Amostragem, preparação da amostra, porções de ensaio e procedimentos operacionais realizados.

Figura 40 - Esquema para a realização do Tumbler Test.



Fonte: Duarte, 2016.

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

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

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A dosagem ponderada dos correspondentes da mistura a partir da decisão da relação entre os constituintes encaminha resultados que apontam uma tendência relevante no presente estudo.

A análise química das amostras de sínter realizado pelo laboratório no NOMOS no Rio de Janeiro apresenta os percentuais dos constituintes colhidos, a partir, de ensaio com digestão de ácidos fortes e leitura em equipamento de absorção atômica.

Ensaio com digestão em ácidos fortes

Leitura em equipamento absorção atômica

Tabela 11 – Constituintes dos sínteres obtidos a partir das 5 misturas

Constituintes	Fe %	FeO %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Na ₂ O %	MgO %	P %	K ₂ O %	CaO %	TiO ₂ %	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₅	Mn
Mistura 1	47,15	8,25	10,15	5,4	0,07	0,33	0,225	0,01	12,27	0,42	0,02	0,11	4,01
Mistura 2	49,34	6,9	9,12	5,28	0,06	0,25	0,155	0,03	10,87	0,29	0,02	0,08	4,22
Mistura 3	47,7	8,92	10,42	6,23	0,06	0,32	0,142	<0,01	10,1	0,41	0,03	0,08	5,65
Mistura 4	49,1	11,43	11,6	6,15	0,06	0,3	0,116	0,03	7,95	0,51	0,03	0,09	3,99
Mistura 5	49,05	10,75	12,5	5,75	0,06	0,16	0,134	0,01	8,85	0,32	0,03	0,1	3,2

Fonte: Autor, 2018

Cabe ressaltar que a tendência do deslocamento percentual de alguns constituintes que impactam na qualidade do produto (Sínter) e questões relativas ao processo de redução nos Altos Fornos.

Os percentuais de Fe nas misturas têm variação menor que 2%. Este constituinte é desejável e só traz vantagens ao processo de redução, quanto ao percentual de FeO, variações superiores são constatadas e patamares acima de 9% indesejáveis, na medida em que, altos teores dificultam a redução e demandam maior consumo de carvão nos fornos.

Os teores de sílica encaminham tendência de crescimento das misturas 1 a 5 o que aponta para queda da Basicidade que em conjunto com o crescimento do teor de FeO, traz consequências no consumo de carvão e redução da produtividade.

As misturas 1 e 2 com basicidade intermediária CaO/SiO₂ encaminham para resistência mecânica adequada, menor consumo de carvão e menor geração de escória que patamares de alta basicidade (1,6 e 1,8).

Sínter da Mistura 1

Figura 41 – Amostra de sínter obtida após processamento da mistura 1



Fonte: Autor, 2018

Composição da Mistura

Tabela 12– Composição mistura 1

Material	Percentual %
Laterita	30
Pellet Feed	30
Pó de Cal	9,5
Retorno	20
Moinha	7,5
Pó de Balão	3

Fonte: Autor, 2018

Análise Química

Tabela 13– Análise química mistura 1

Amostra	Fe %	FeO %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	P %	CaO%
Teste 01	47,15	8,25	10,15	5,40	0,225	12,27

Fonte: Autor, 2018

Sínter da Mistura 2

Figura 42– Amostra de sínter obtida após processamento da mistura 2



Fonte: Autor, 2018

Composição da Mistura

Tabela 14– Composição mistura 2

Material	Percentual %
Laterita	30
Pellet Feed	30
Pó de Cal	9,5
Retorno	18,5
Moinha	9
Pó de Balão	3

Fonte: Autor, 2018

Análise Química

Tabela 15– Análise química mistura 2

Amostra	Fe %	FeO %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	P %	CaO%
Teste 02	49,34	6,90	9,12	5,28	0,155	10,87

Fonte: Autor, 2018

Sínter da Mistura 3

Figura 43 – Amostra de sínter obtida após processamento da mistura 3



Fonte: Autor, 2018

Composição da Mistura

Tabela 16– Composição mistura 3

Material	Percentual %
Laterita	32
Pellet Feed	30
Pó de Cal	6
Retorno	20
Moinha	9
Pó de Balão	3

Fonte: Autor, 2018

Análise Química

Tabela 17– Análise química mistura 3

Amostra	Fe %	FeO %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	P %	CaO%
Teste 03	47,70	8,92	10,42	6,23	0,142	10,10

Fonte: Autor, 2018

Sínter da Mistura 4



Figura 44-- Amostra de sínter obtida após processamento da mistura 4

Fonte: Autor, 2018

Composição da Mistura

Tabela 18 - Composição mistura 4

Material	Percentual %
Laterita	40
Pellet Feed	20
Pó de Cal	5
Retorno	21,5
Moinha	10,5
Pó de Balão	3

Fonte: Autor, 2018

Análise Química

Tabela 19-- Análise química mistura 4

Amostra	Fe %	FeO %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	P %	CaO%
Teste 04	49,10	11,43	11,60	6,15	0,116	7,95

Sínter da Mistura 5

Figura 45 - Amostra de sínter obtida após processamento da mistura 5



Fonte: Autor, 2018

Composição da Mistura

Tabela 20 - Composição mistura 5

Material	Percentual
Laterita	40
Pellet Feed	10
Pó de Cal	5
Retorno	34,5
Moinha	10,5
Pó de Balão	0

Fonte: Autor, 2018

Análise Química

Tabela 21 – Análise química mistura 5

Amostra	Fe %	FeO %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	P %	CaO%
Teste 05	49,05	10,75	12,50	5,75	0,134	8,85

Fonte: Autor, 2018

A análise química resultante do processamento dos ensaios revelou que do ponto de vista do montante de Ferro, o percentual de Ferro Total (Fet) que resulta da soma dos percentuais de Fe e FeO, mostra-se atrativo quando comparado à sínteres obtidos com a utilização de matérias-primas de partida mais nobres.

Nota-se que o percentual a ser acrescido de FeO no Fet, é aquele derivado do percentual da massa molecular do ferro na wustita.

Ensaio com digestão em ácidos fortes

Leitura em equipamento absorção atômica

Tabela 22 – FeT estimado nos sínteres

Sínter/Misturas	Fe %	FeO %	FeT%
1	47,15	8,25	53,42
2	49,34	6,90	54,58
3	47,70	8,92	54,47
4	49,10	11,43	57,78
5	49,05	10,75	57,22

Fonte: Autor, 2018

Considerando uma possível adição de carepa na mistura de partida pode-se elevar com garantias o percentual de Fet no sínter para a faixa de 59 a 60%. O teor de carepa a ser misturado seria na faixa entre 5 a 8%. O teor médio de ferro na carepa situa-se na média de 69 a 75%.

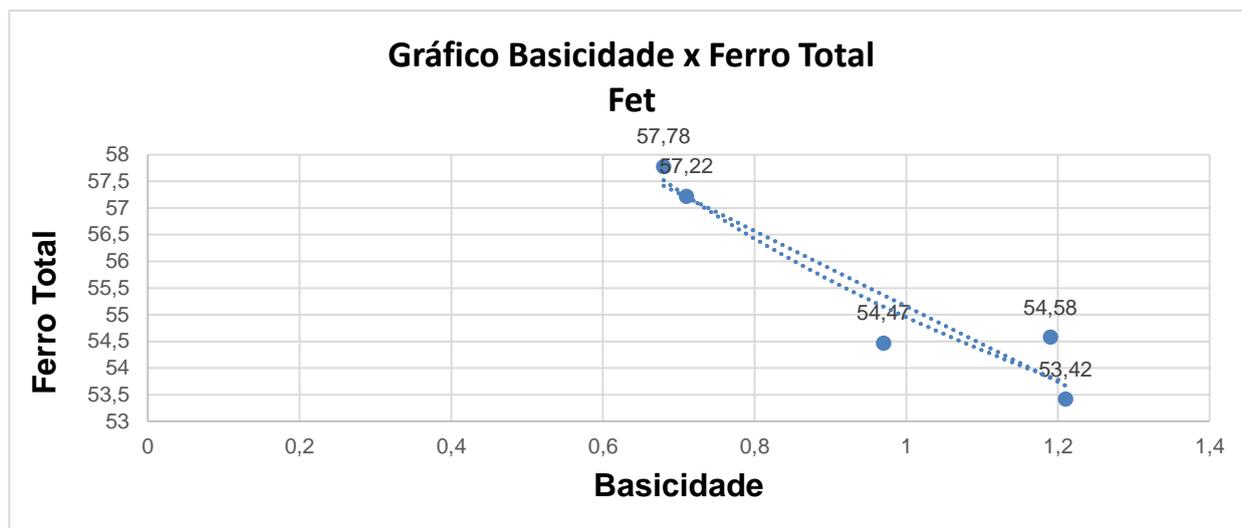
Avaliação da Basicidade Binária CaO/SiO₂

Tabela 23 – Basicidade dos Sínteres das Misturas

Componentes	CaO (%)	SiO ₂ (%)	CaO/SiO ₂ (%)
Sínter Mistura 1	12,24	10,15	1,21
Sínter Mistura 2	10,87	9,12	1,19
Sínter Mistura 3	10,10	10,42	0,97
Sínter Mistura 4	7,95	11,60	0,685
Sínter Mistura 5	8,85	12,50	0,71

Fonte: Autor, 2018

Figura 46 – Gráfico Basicidade x Ferro Total



Fonte: Autor, 2018

Resultados do Shatter Test

Para a realização do “Shatter Test” a amostra seca é peneirada em malhas de abertura de 50mm, 38mm, 25mm e 9,5mm sendo desprezadas as partes de materiais acima de 50mm e abaixo de 9,5mm após o processo de ajuste da morfologia.

As amostras passaram por processo de pesagem e foram dispostas em quatro porções para ensaio sendo que 20kg cada porção. Uma porção para ensaio foi acondicionada na caixa de amostra e processada em quatro quedas. Após a quarta queda de altura de 2m amostra foi novamente peneirada em malha de 9,5mm e a resistência a queda foi avaliada como a razão entre a massa de retida na malha de 9,5 mm e a massa inicial da porção do ensaio (PI). O índice de qualidade mínimo considerado na ABNT NBR 10633 é de 80%.

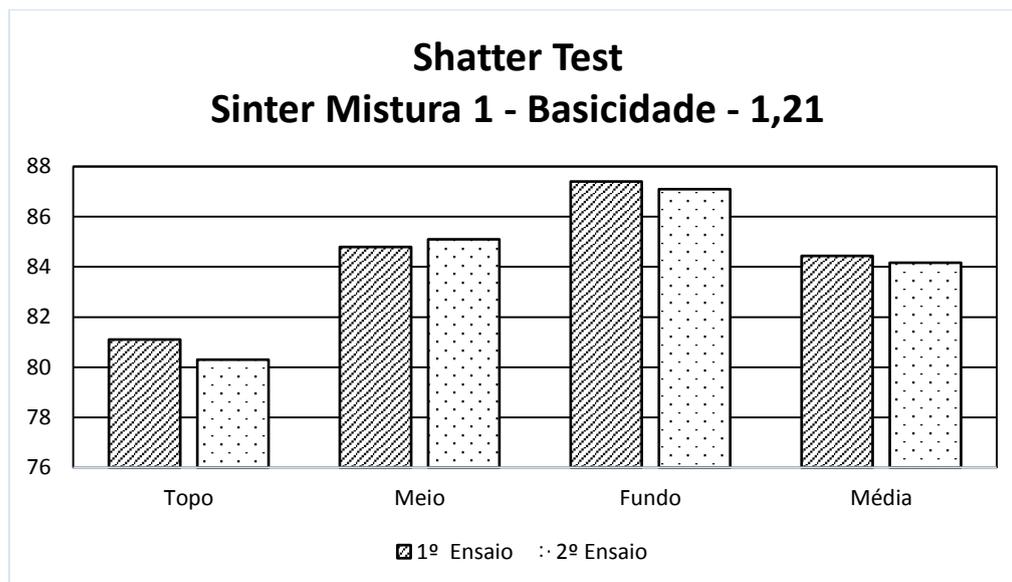
Shatter Test do Sínter da Mistura 1 – Basicidade – 1,21

Tabela 28 – Percentuais obtidos no Shatter Test Mistura 1

Ensaio	Topo	Meio	Fundo	Média
1°	81,1	84,8	87,4	84,43
2°	80,3	85,1	87,1	84,17

Fonte: Autor, 2018

Figura 47- Gráfico Shatter Test Mistura de Sínter 1



Basicidade em faixa operacional adequada (1,0 a 1,2), resistência a queda adequada.

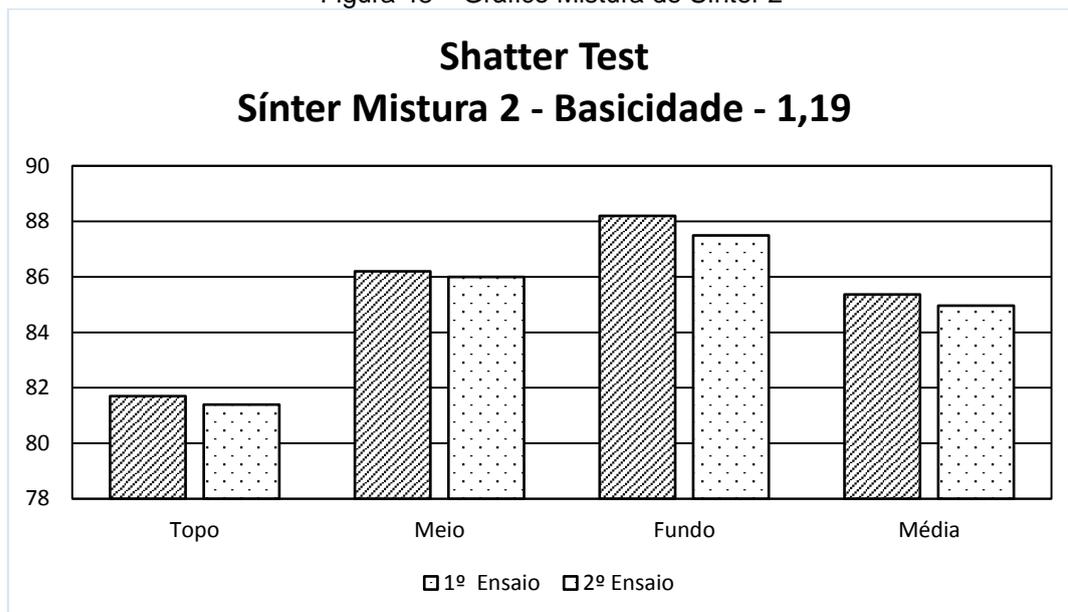
Shatter Test do Sínter da Mistura 2 - Basicidade - 1,19

Tabela 29 - Percentuais obtidos no Shatter Test Mistura 2

Ensaio	Topo	Meio	Fundo	Média
1°	81,7	86,2	88,2	85,37
2°	81,4	86,0	87,5	84,97

Fonte: Autor, 2018

Figura 48 – Gráfico Mistura de Sínter 2



Fonte: Autor, 2018

Basicidade em faixa operacional adequada (1,0 a 1,20), resistência a queda adequada.

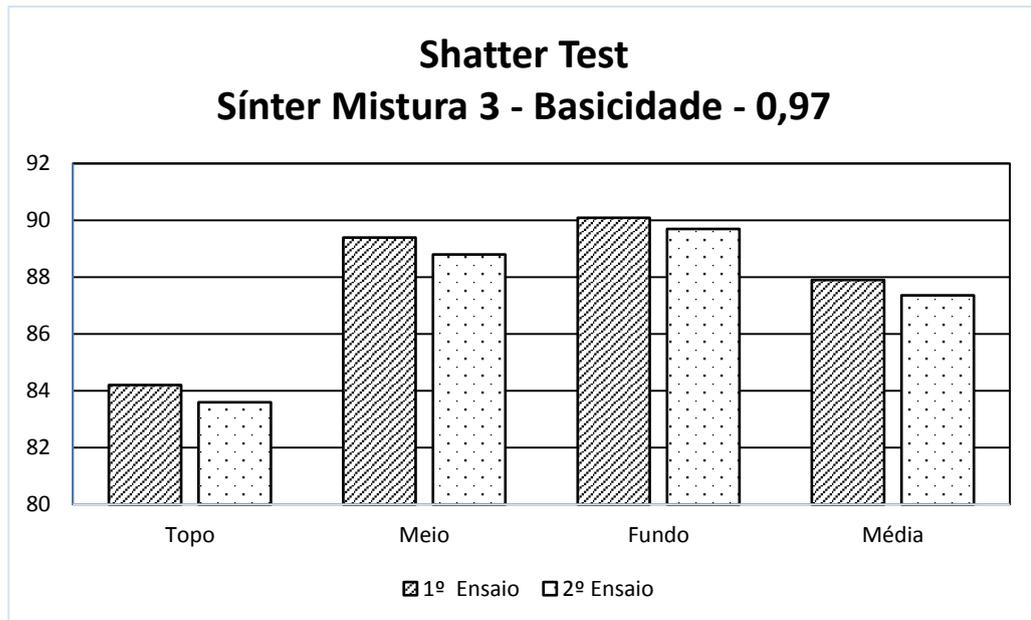
Shatter Test do Sínter da Mistura 3 - Basicidade - 0,97

Tabela 30 - Percentuais obtidos no Shatter Test Mistura 3

Ensaio	Topo	Meio	Fundo	Média
1º	84,2	89,4	90,1	87,90
2º	83,6	88,8	89,7	87,37

Fonte: Autor, 2018

Figura 49 – Gráfico Mistura de Sínter 3



Basicidade próxima a faixa adequada (1,0 e 1,20), boa resistência mecânica.

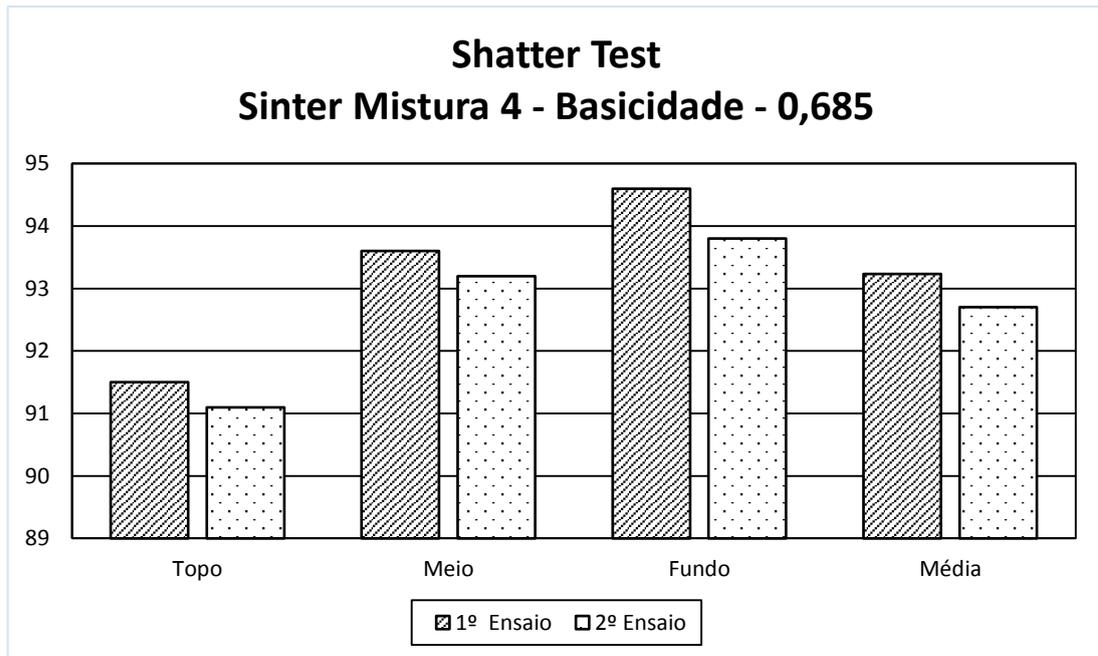
Shatter Test do Sínter da Mistura 4 - Basicidade - 0,685

Tabela 31 - Percentuais obtidos no Shatter Test Mistura 4

Ensaio	Topo	Meio	Fundo	Média
1º	91,5	93,6	94,6	93,23
2º	91,1	93,2	93,8	92,70

Fonte: Autor, 2018

Figura 50 – Gráfico Mistura de Sínter 4



Fonte: Autor, 2018

Basicidade abaixo da faixa adequada (1,0 a 1,2), alta resistência mecânica.

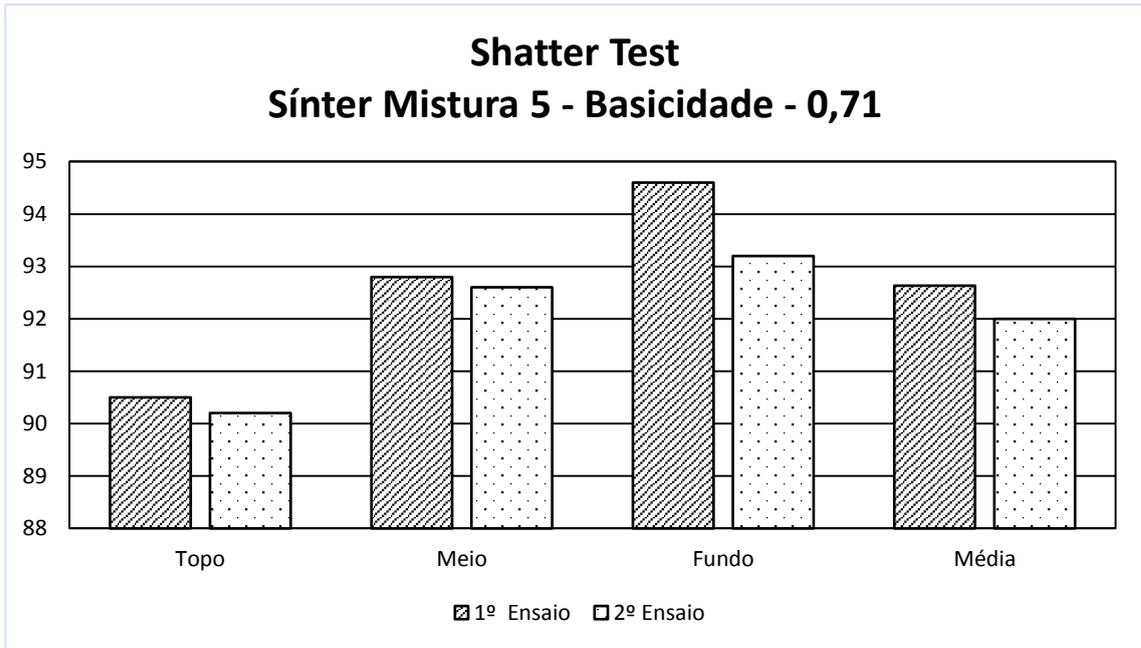
Shatter Test do Sínter da Mistura 5 - Basicidade – 0,71

Tabela 32 - Percentuais obtidos no Shatter Test Mistura 5

Ensaio	Topo	Meio	Fundo	Média
1º	90,5	92,8	94,6	92,63
2º	90,2	92,6	93,2	92,00

Fonte: Autor, 2018

Figura 51 – Gráfico Mistura de Sínter 5



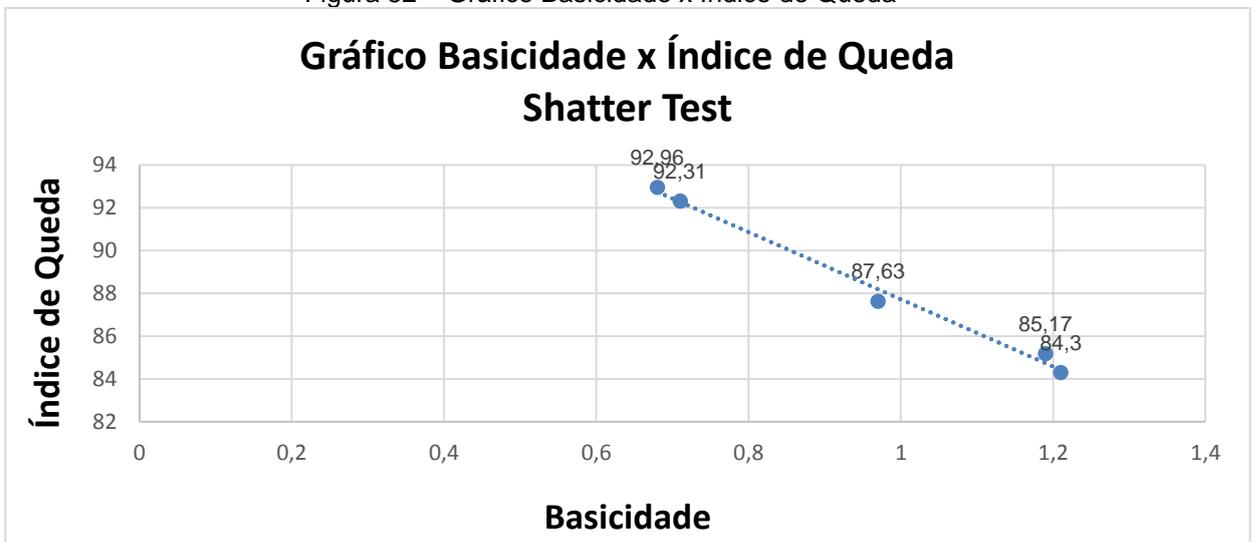
Fonte: Autor, 2018

Basicidade abaixo da faixa adequada (1,0 e 1,20), alta resistência mecânica.

Todos os índices de qualidade apurados situam-se acima dos 80% mesmo considerando posições de amostragem de topo, meio e fundo do leito de sinterização da panela.

O teste contou com apenas duas repetições pois obteve-se percentagem superior a 80% nos dois ensaios. O teste foi realizado duas vezes para topo, meio e fundo em um total de 6 ensaios por tipo de mistura.

Figura 52 – Gráfico Basicidade x Índice de Queda



Fonte: Autor, 2018

Tumbler Test – Tamboramento

Os valores médios asseguram adequação da resistência mecânica, os sínteres com basicidade mais baixa mostram-se mais resistentes.

A execução do Tumbler test tem como ponto de partida a coleta de amostras de base seca que são peneiradas em telas de abertura 25mm, 16mm e 10mm. São descartadas as porções superiores a 25mm e inferiores a 10mm em etapa posterior ao peneiramento, as amostras foram pesadas e dispostas em lotes de 15kg cada, uma das porções selecionada é acondicionada no interior do tambor. Depois de vedada a porta do tambor, foram implementadas 200 revoluções com 25 RPM. Aguardou-se por 2 minutos a deposição do pó em suspensão.

O material removido do tambor, foi peneirado em tela de 6,30mm de abertura, foi calculado o índice de tamboramento como a razão percentual entre a massa retida na tela de 6,30mm denominada de (Pf) e a massa inicial introduzida no tambor (Pi).

O índice encontrado foi maior que 60% exigido pela Norma NBR 150 3271, o índice de tamboramento (IT) acima dos 60% quando do 1º ensaio para meio e fundo do leito de fusão e no 2º ensaio compreendendo topo, meio e fundo do leito de fusão.

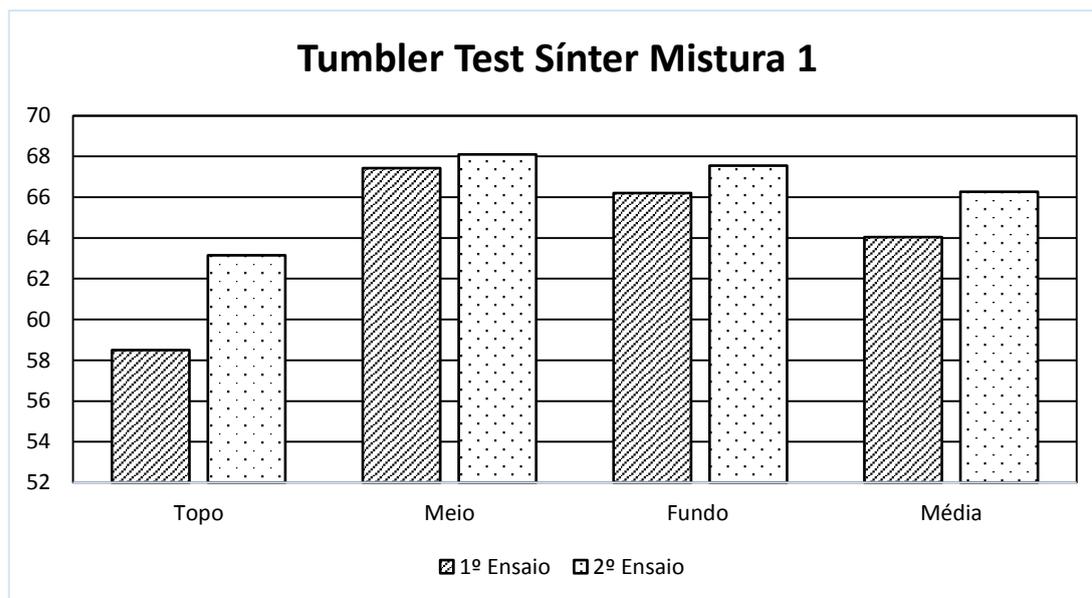
Tumbler Test do Sínter da Mistura 1

Tabela 33 – Percentuais obtidos no Tumbler Test Mistura 1

Ensaio	Topo	Meio	Fundo	Média
1º	58,5	67,43	66,2	64,04
2º	63,15	68,1	67,55	66,27

Fonte: Autor, 2018

Figura 53 - Gráfico Tumbler Test Sínter Mistura 1



Fonte: Autor, 2018

Basicidade adequada e resistência dentro da faixa aceitável.

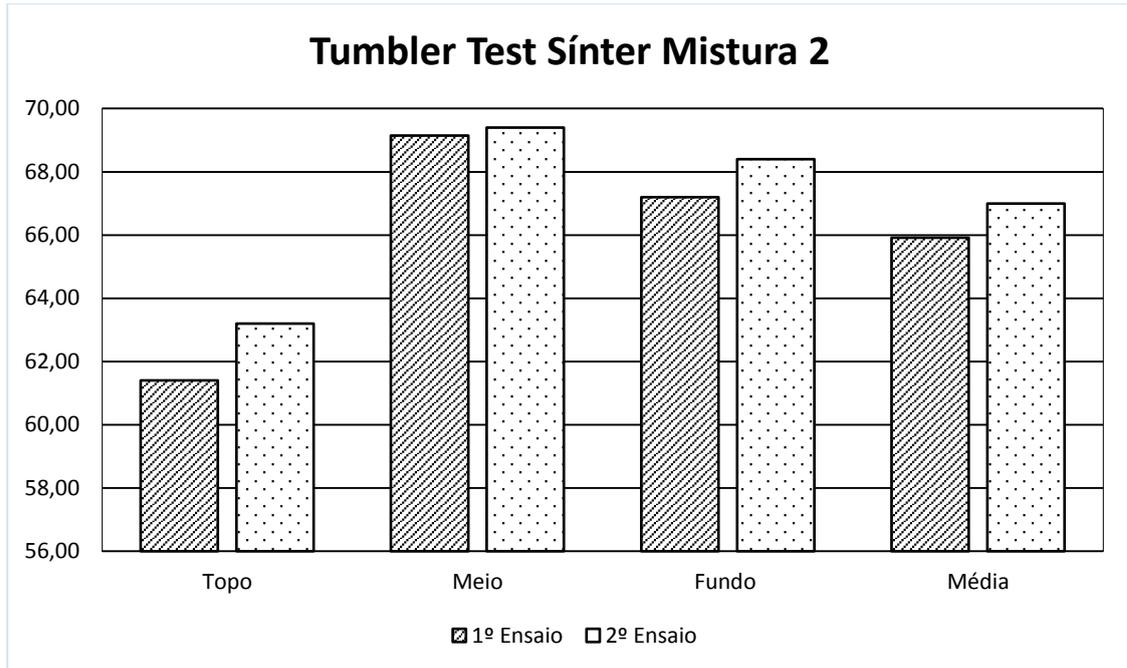
Tumbler Test do Sínter da Mistura 2

Tabela 34- Percentuais obtidos no Tumbler Test Mistura 2

Ensaio	Topo	Meio	Fundo	Média
1º	61,40	69,15	67,20	65,92
2º	63,20	69,40	68,40	67,00

Fonte: Autor, 2018

Figura 54 - Gráfico Tumbler Test Sínter Mistura 2



Fonte: Autor, 2018

Basicidade adequada e resistência dentro da faixa aceitável.

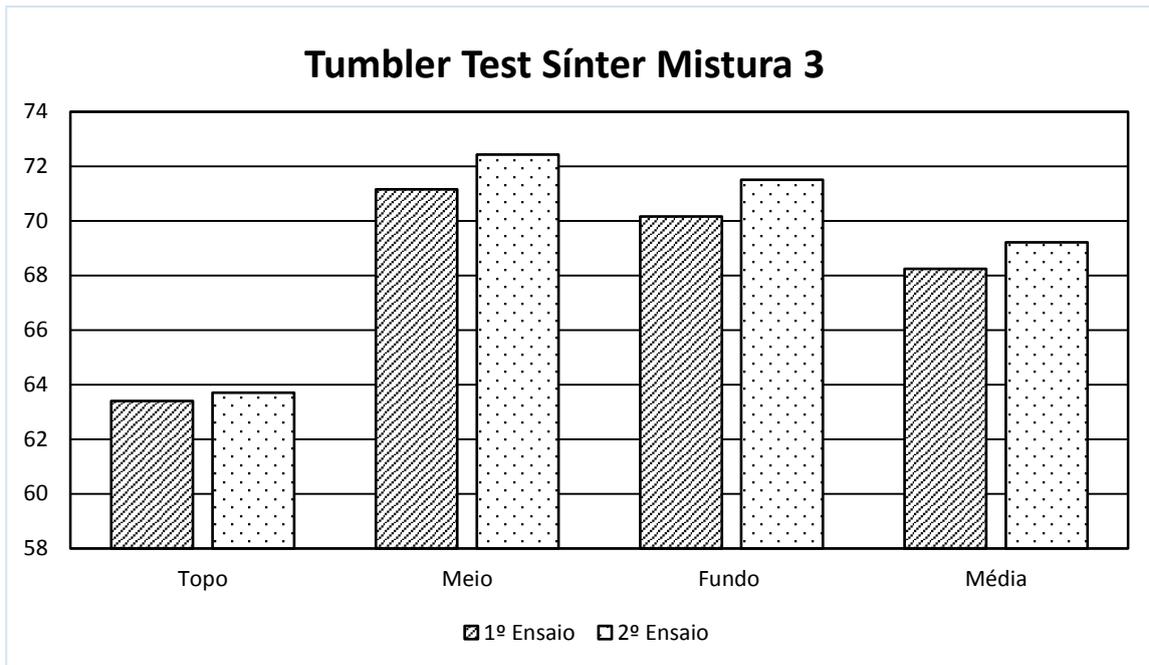
Tumbler Test do Sínter da Mistura 3

Tabela 35 - Percentuais obtidos no Tumbler Test Mistura 3

Ensaio	Topo	Meio	Fundo	Média
1º	63,4	71,15	70,16	68,24
2º	63,7	72,43	71,5	69,21

Fonte: Autor, 2018

Figura 55 - Gráfico Tumbler Test Sínter Mistura 3



Fonte: Autor, 2018

Basicidade baixa e resistência dentro da faixa aceitável.

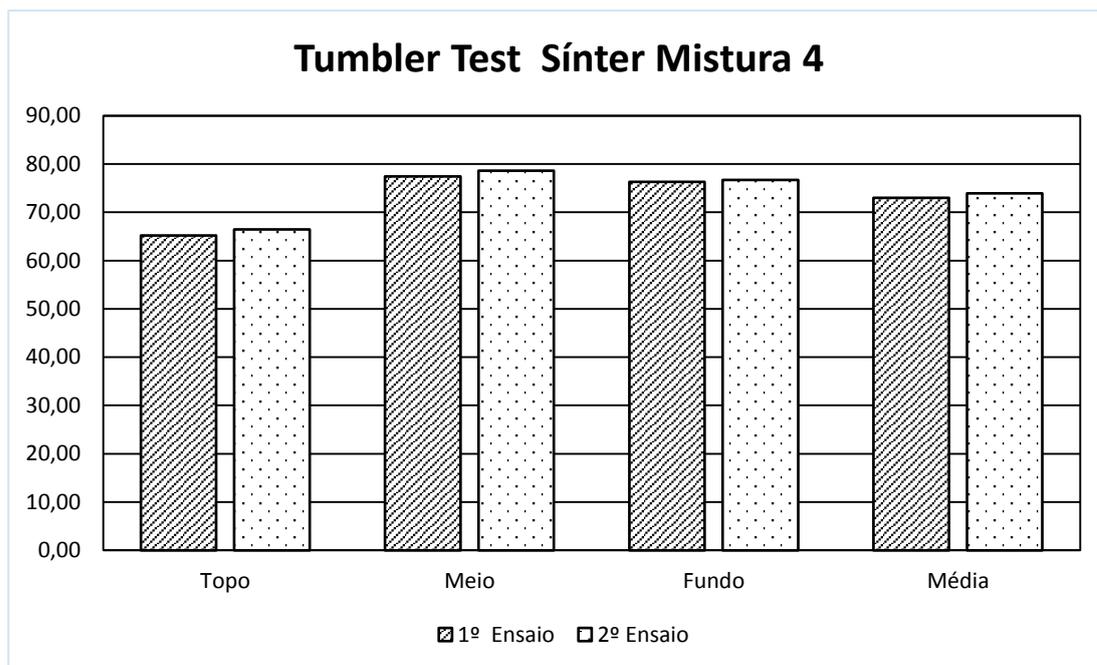
Tumbler Test do Sínter da Mistura 4

Tabela 36 - Percentuais obtidos no Tumbler Test Mistura 4

Ensaio	Topo	Meio	Fundo	Média
1º	65,2	77,45	76,27	72,97
2º	66,48	78,63	76,72	73,94

Fonte: Autor, 2018

Figura 56 - Gráfico Tumbler Test Sínter Mistura 4



Fonte: Autor, 2018

Basicidade muito baixa e resistência alta.

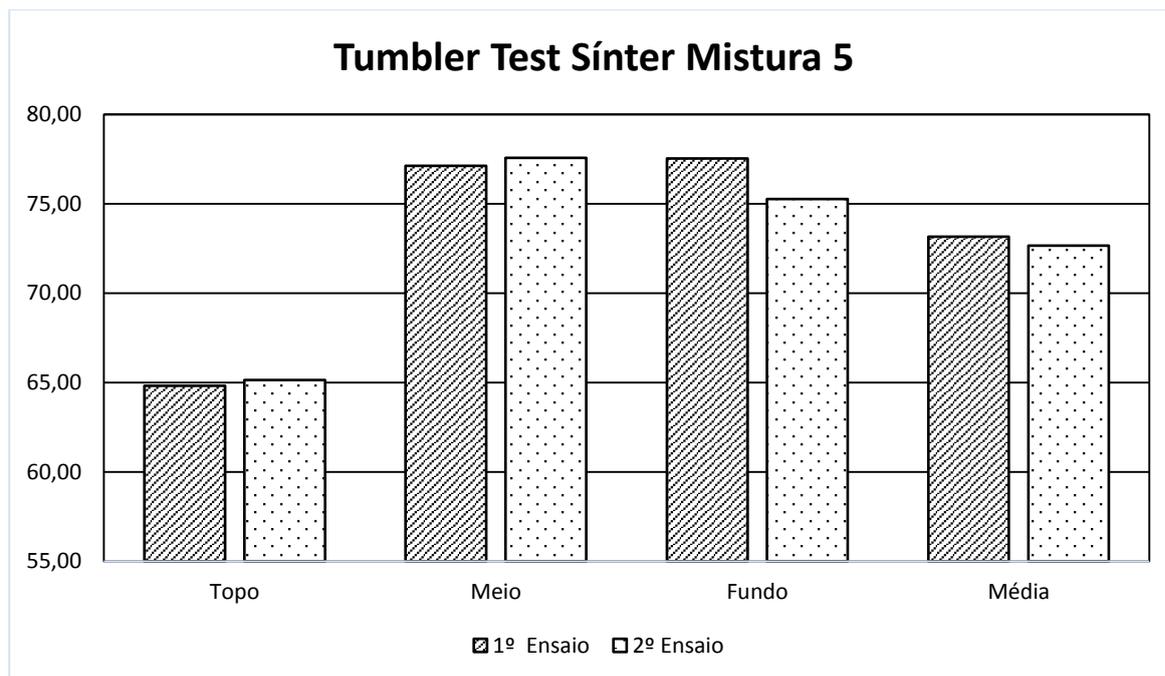
Tumbler Test do Sínter da Mistura 5

Tabela 37 - Percentuais obtidos no Tumbler Test Mistura 5

Ensaio	Topo	Meio	Fundo	Média
1º	64,82	77,13	77,55	73,17
2º	65,15	77,58	75,27	72,67

Fonte: Autor, 2018

Figura 57 - Gráfico Tumbler Test Sínter Mistura 5



Fonte: Autor, 2018

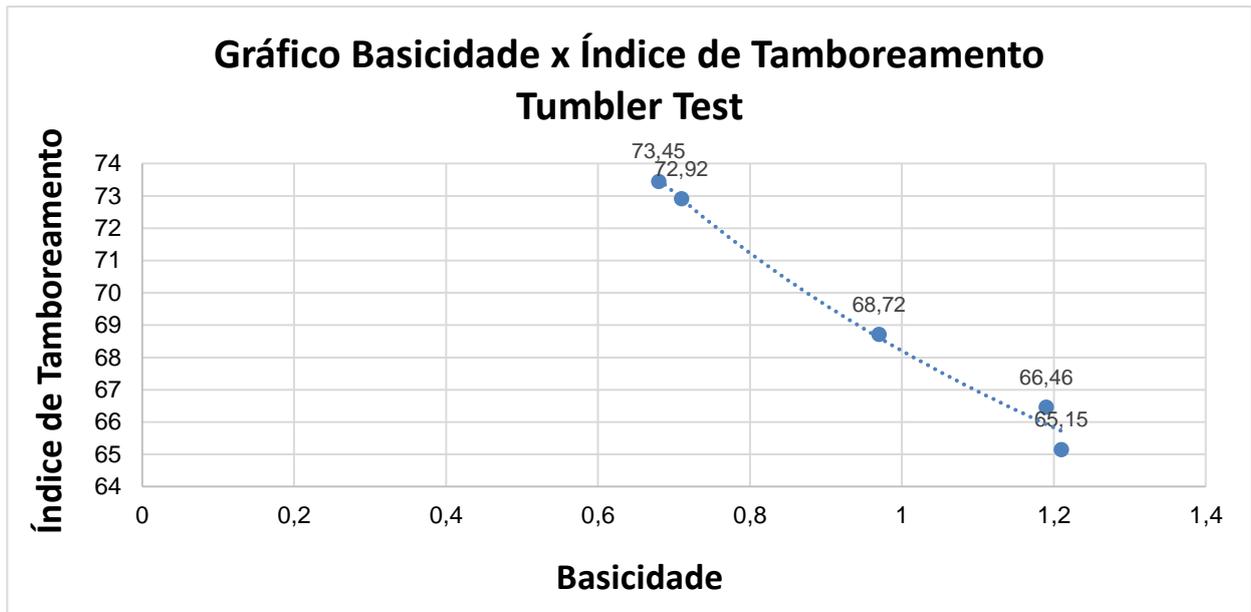
Basicidade muito baixa e resistência alta.

Como no 1º ensaio da 1ª mistura a amostra do topo apresentou (IT) abaixo de 60%, fizemos o 2º ensaio para a 1ª mistura e optamos por padronizar esta prática para as demais misturas.

Mesmo considerando as diferenças nas avaliações de “IQ” e “IT” quando são avaliadas as amostras provenientes de topo, meio e fundo do leito de fusão, cabe ressaltar que todas as misturas utilizadas na produção dos sínteres, mostraram-se aptas para estruturação de produtos que atendem às normas quanto à resistência mecânica.

Os valores médios obtidos para os testes em todos os casos situam-se em faixas de adequação com relativa folga. Os sínteres com basicidade mais baixa se mostram mais resistentes e coeses, o que era esperado.

Figura 58 - Gráfico Basicidade x Índice de Tamboreamento



Fonte: Autor, 2018

5. CONCLUSÕES

Considerando a elaboração de sinteres utilizando finos minério de ferro com características lateríticas, pode-se encaminhar as seguintes conclusões preliminares:

Mesmo considerando os materiais de partida menos nobres e os constituintes da mistura complementar também com características qualitativamente abaixo daquelas de materiais comerciais padrão, os resultados de análise química e resistência mecânica do produto se apresentam numa faixa de adequação satisfatória, ou seja, todas as misturas apresentaram resistência mecânica superior às preconizadas como referenciais nas normas específicas, sendo que, em alguns casos, a resistência apurada se mostrou em patamares bem superiores.

O complemento para o fino de minério laterítico utilizado foi o Pellet Feed (material muito fino) disponível para os testes e a princípio, adequado para a estruturação de pelotas, mas, em nosso caso, aproveitado como complementar ao minério de matriz laterítica. Outra possibilidade para complementação da carga de minério, projetando-se resultados mais vantajosos, poderia ser o sinter feed lavado o que certamente reduziria o percentual de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e dessa forma, garantiria um teor de ferro mais elevado sem que houvesse muita pressão nos custos de matéria prima.

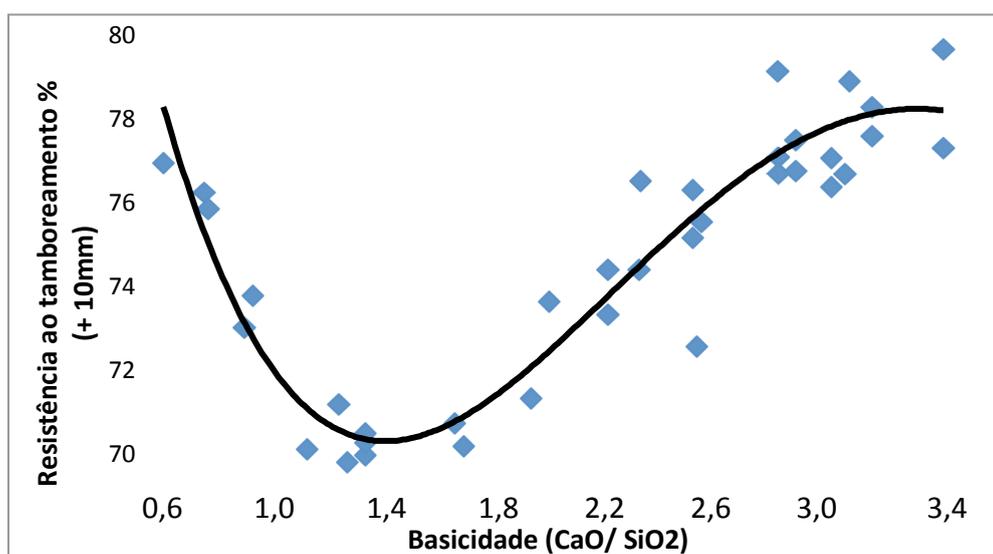
Com a elevação do percentual de finos lateríticos algumas características de sustentabilidade foram melhoradas, o que aponta para a possibilidade de utilizar-se esse percentual de fino laterítico superior ao percentual de Pellet Feed ou mesmo Sinter Feed.

A princípio, resistência a frio do sinter decorre, de forma básica, da resistência de cada componente mineral utilizado, da resistência do agente de aglomeração e da composição da base mineral (DAWSAN, 1993). Estudos desenvolvidos sobre a tenacidade à fratura de várias fases minerais apontaram para uma proposição de ordem de queda na resistência designada para o sinter.

A resistência do produto (sinter), pode adicionalmente ser afetada de forma progressiva a partir da adição de MgO , pois, sua tendência é diminuir com aumento da fração de MgO .

O índice de basicidade do sínter afeta de forma impactante a resistência à frio (Fedorenko, 1970) avaliou a variação da resistência à frio com a variação da basicidade entre 0,6 e 3,4.

Nos estudos empreendidos foi avaliado que, partindo-se de uma basicidade da carga igual a 0,6, a resistência a frio do sínter reduz na medida do aumento da basicidade até se atingir um valor mínimo na basicidade de 1,4. A partir deste patamar, a resistência volta a crescer de forma acentuada.



Em nosso caso, as misturas produziram sínteres que variando seu índice de basicidade, impõem propriedades ao sínter que devem ser avaliadas, considerando a resistência mecânica, a facilidade de redução em Alto Forno e a geração de escória. Dessa forma, os valores situados na faixa intermediária (basicidade entre 1,0 e 1,20), se apresentam como potencialmente atendendo aos três quesitos, ou seja, um consumo de carvão no Forno em faixa aceitável, uma resistência aceitável e um potencial gerador de escória bem controlado.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, temos:

- (i) Modificar as misturas, introduzindo percentuais crescentes de Sínter Feed lavado em substituição ao Pellet Feed;
- (ii) Modificar as misturas introduzindo percentuais de carepa, variando entre 3% e 5%;
- (iii) Considerar a construção de experimento coleta de dados para avaliação do índice de redutibilidade e índice de degradação em redução.

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: 04 abril 2018.

AMARAL, S.C. **Estudo de misturas laterita-asfalto da região metropolitana de Belém-PA para revestimentos de pavimento**. Tese de D.Sc., Escola Politécnica/USP, São Paulo, SP, Brasil, 2004.

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. 2018

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.

ASSUNÇÃO, F. C. R. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: Gestão de coprodutos**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008.

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 fevereiro. 2018.

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.

CARVALHO, Eduardo Augusto de; BRINCK, Valter. **Briquetagem. Comunicação técnica elaborada para o livro tratamento de minérios: Capítulo 15 – 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: 10 mar. 2018.**

- CHAVES, Alin Júnior Machado. *Noções de Metalurgia*. Minas Gerais: UFMG, 2009. Disponível em: <http://www.trabalhosfeitos.com/ensaios.html>. Acesso em: 10 abril 2018.
- 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: 36° Seminário internacional de fusão, refino e solidificação dos metais, 2006.
- DAWSAN, P.R. **Recent Developments in Iron Ore Sintering - Part 1 Introduction**. Ironmaking and Steelmaking, v. 20,n.2, p. 135-136, 1993.
- DE, A; GUPTA, S.S.; CHATTERJEE, A; MUKHERJEE, T. – **Possibility of Dunite Usage in Sintermaking: Studies at Tata Steel**. Ironmaking and Steelmaking, 1995.
- DUARTE, Adailson da Silva. **Síntese e Cracterização de Sínter utilizando resíduos siderúrgicos com foco na resitência mecânica**. UniFOA. Volta Redonda, 2016.
- 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: 08 março. 2013
- FEDORENKO, S.B.; SOKOLEVSKIRKH, G.F.; RUSYAKOVA, M.G. et al. **Properties of Sinter of Basicity 0.6-3.4**. Metallurgist, v.14, n.9, p 552-554, 1970.
- HONORATO, E.P. **Adequação granulométrica das matérias-primas e do sistema de segregação contínua (I.F.S.) para melhorias na produtividade e qualidade do sínter para os altos-fornos**. Belo Horizonte. 2005.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Gestão para sustentabilidade na mineração: 20 anos de história**. Brasil: IBRAM, 2012.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA (IBS). **Siderurgia Brasileira: princípios e políticas. 2007**. Disponível em: <http://www.ibs.com.br>. Acesso em: 11 fevereiro. 2018
- INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB). **Relatório de sustentabilidade 2014**. Rio de Janeiro, 2014.
- JACOMINO, Vanusa Maria Feliciano; et al. **Controle ambiental das indústrias de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal**. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002.
- JANUZZI, Aércio. **Análise da aglomeração a frio no processo HPS (Hybrid Pelletized Sínter) com ênfase nas matérias-primas envolvidas**. São Paulo. 2008.
- JOHN, Vanderley M.; Ângulo; Sérgio Cirelli. **Metologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos**. Porto Alegre: ANTAC, 2009.
- LEMOS, Leandro Rocha. **Produção de briquetes de resíduos siderúrgicos para utilização em altos-fornos. / Leandro Rocha Lemos – Belo Horizonte: UFMG: 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: 07 jan. 2018.

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: 07 jan. 2018.

LOVEL, Roy R. et al. **The influence of Fuel Reactivity on Iron Ore Sintering**. ISIJ International, v. 49, n. 2, p. 195-202, 2009.

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. 2018

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: 15 mar. 2018

MANTOVANI, M. C. **Caracterização de poeiras geradas em forno elétrico a arco e seu estudo quando aglomeradas na forma de pelotas auto-redutoras**. 165p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

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.cgge.org.br/atividades/redirect.php?idProduto=4841>>. Acessado em: 15 mar. 2018

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

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. 2018

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

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

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

OLIVEIRA, Eduardo Reis de; MARTINS, Jader. **Emprego de resíduos siderúrgicos e pellet feed minipelotizados na sinterização de minério de ferro**. Revista Escola de Minas, Ouro Preto. out/dez 2003.

OYAMA, N.; SATO, H.; TAKEDA, T. **Development of Coating Granulation Sintering Process for Improving Productivity and Reducibility**. The 5th European Coke and Ironmaking Congress, Stockholm – Swiden – Second Volumew, Tu 9: 1 16, june 2005.

PEREIRA, Hélio C. **Avaliação em escala piloto do comportamento dos produtos pellets feed, pellet screenings e micro pellet em substituição ao sinter feed em uma mistura de sinterização**. São Paulo 2004.

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

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

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

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

SAMPAIO, João Alves; COSTA, Lauro Santos N.; ANDRADE, Marcelo Correa de. **Ensaio contínuos 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. 2018

SANTOS, D. M.; LENZ G., 2000. **A reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos, Seminário Nacional sobre Reuso/Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais**. São Paulo. Disponível em: http://www.ambiente.sp.gov.br/residuos/ressolid_ind/palest.htm.

Acesso em: 02 fev 2018

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: 30 abril. 2018

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

TAKANO, C.; CAPOCCHI J. D. T.; NASCIMENTO, R. C.; MOURÃO, M. B.; SANTOS, D. M.; LENZ G. **A reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos**. São Paulo. 2000

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: 10 mar. 2018.

TEIXEIRA, W., TOLEDO, M.C.M., FAIRCHILD, T. R., et al. **Decifrando a terra**. São Paulo. Oficina dos Textos, 2000.

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 abril. 2018

YADAV, U.S.; DAS, B.K.; KUMAR, Ashok; SANDHU, H.S. **Solid Wastes Recycling through Sinter – Status at Tata Steel**. In: Clean Technologies for Metallurgical Industries, 2002, Jamshedpur.