

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE MATERIAIS – MESTRADO PROFISSIONAL**

**Caracterização de Sínter de Minério de Ferro  
para Uso em Altos-Fornos a Carvão Vegetal**

**Marcelino Vieira Lopes**

Itajubá, Dezembro de 2012

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE MATERIAIS - MESTRADO PROFISSIONAL**

**Marcelino Vieira Lopes**

**Caracterização de Sínter de Minério de Ferro  
para Uso em Altos-Fornos a Carvão Vegetal**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais – Mestrado Profissional como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Materiais – Mestrado Profissional.

Área de Concentração: Desenvolvimento, Processamento e Caracterização de Materiais

Orientador: **Prof. Dr. Geovani Rodrigues**

Co-orientador: **Prof. Dr. Rogério José da Silva**

Dezembro de 2012  
Itajubá - M.G.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL**

**Caracterização de Sínter de Minério de Ferro  
para Uso em Altos-Fornos a Carvão Vegetal**

Autor: **Marcelino Vieira Lopes**

Orientador: **Prof. Dr. Geovani Rodrigues**

Co-orientador: **Prof. Dr. Rogério José da Silva**

Composição da Banca Examinadora:

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Andersan dos Santos Paula – UFF**

**Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa - UNIFEI**

**Prof. Dr. Rogério José da Silva – UNIFEI**

**Prof. Dr. Geovani Rodrigues - UNIFEI**

## **Dedicatória**

*À minha esposa Edineia  
e as minhas filhas  
Camila e Júlia.*

## **Agradecimentos**

A Edineia, Camila e Júlia. Pela compreensão, incentivo e apoio incondicional que permitiram a conclusão de mais esta etapa em minha vida acadêmica e profissional.

A ArcelorMittal Juiz de Fora cujo apoio foi decisivo para a realização deste projeto. A Waldenir Luciano de Souza Lima e Tarcísio Bomtempo Martins que apoiaram esta iniciativa desde o primeiro momento. Aos meus colegas de trabalho que muito contribuíram no andamento dos trabalhos desenvolvidos: Márcio Bráz, Pedro Luiz de Souza, Ricardo Dilly, Luiz Carlos Pinheiro Prioste, Raimundo Nonato Eugênio, Carlos Roberto Maciel, Carlos de Souza Gomes, Rafael Silva, Carlos Alberto de Paulo e Márcio Araújo.

Aos professores da Universidade Federal de Itajubá, pela qualidade e pelo entusiasmo no desempenho da profissão que exercem. Em especial Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Mirian Motta Melo, Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Regina Mambeli Barros, Prof. Dr. Geovani Rodrigues, Prof. Dr. Rogério Silva, Prof. Dr. José Célio, Prof. Dr. Daniel Thomazini e Prof. Me. Marcos Picilli.

Aos meus colegas de curso pela excelente convivência e intercâmbio de experiências e de informações, dos quais destaco: Gumerindo Naia, Rayana Lourenço, Ângelo de Souza, Alexandre Ottoboni, Leonardo “Nepal”, Daniel Zaroni, Mara Lucy e Roberto Corrêa.

Especial agradecimento aos meus orientadores, Professores Geovani e Rogério, pela atenção, disposição e cordialidade durante o desenvolvimento deste trabalho.

*Tudo deveria se tornar o mais simples possível, mas não simplificado.*

*Albert Einstein.*

## Resumo

**LOPES, M. V. (2012)**, *Caracterização de Sinter de Minério de Ferro para Uso em Altos-Fornos a Carvão Vegetal*, Itajubá - MG, 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Itajubá.

Embora a maioria dos altos-fornos no mundo use coque, sinter e pelotas como principais matérias-primas, no Brasil ainda existe um importante segmento que utiliza o carvão vegetal e o minério de ferro granulado, sem a necessidade de nenhum processo de aglomeração. Neste segmento atuam tanto pequenos quanto grandes grupos siderúrgicos, os quais necessitarão encontrar uma alternativa ao minério granulado, pois em breve restará apenas minério de ferro na forma de *sinter feed* ou *pellet feed*. A siderurgia a carvão vegetal sempre adaptou a tecnologia usada pelos altos-fornos a coque, no entanto, neste caso não se pode adotar diretamente a solução mais econômica encontrada por estes, ou seja, a sinterização. Pois, ao contrário da siderurgia a coque, altos-fornos a carvão vegetal trabalham com baixo índice de basicidade ( $\text{CaO/SiO}_2$ ) e o uso de grande quantidade de sinter de alta basicidade nestes resultaria em grande quantidade de escória e consequente dificuldades operacionais. O objetivo deste trabalho foi a produção e caracterização do sinter de minério de ferro adequado para ser utilizado em altos-fornos que tem o carvão vegetal como redutor. Para tanto, foram feitos testes em bancada, produzindo sínteres cobrindo a faixa de basicidade compreendida ente 1,0 a 1,8. Para cada basicidade foram determinados o rendimento, a resistência a frio, o índice de redutibilidade, o índice de degradação sob redução e a quantidade necessária de carvão. A basicidade que melhor apresentou resultados para a siderurgia a carvão vegetal foi a de 1,2. Após a caracterização do sinter em função da basicidade, foram feitos testes para determinar a influência do pó do balão, carepa e pó do sistema de despoeiramento do peneiramento de minério de ferro nos parâmetros de qualidade do sinter. Estes testes demonstraram que o uso de 4% de carepa não afeta a qualidade do sinter. No entanto, os pós afetam o rendimento da sinterização. Notou-se que o pó de minério de ferro prejudica o índice de redutibilidade. Entretanto, os resíduos testados não influenciaram a resistência mecânico a frio e o índice de degradação sob redução do sinter. Para mitigar os efeitos negativos, foi necessário usar um processo de micropelotização destes, antes do processo de sinterização, assim como ajustar a quantidade máxima destes resíduos e também a quantidade de combustível.

**Palavras-chave:** sinter, baixa basicidade, carvão vegetal, minério de ferro, destinação de resíduos.

## Abstract

LOPES, M. V. (2012), *Characterization of Iron Ore Sinter for Use in Blast Furnaces Charcoal*, Itajubá - MG, 99 p. MSc. Dissertation (Master's Degree in Materials Engineering) - Universidade Federal de Itajubá.

Although most of the blast furnaces in the world use coke, sinter and pellets as main raw materials, in Brazil there is still an important segment that uses charcoal and iron ore lump, without the need for any agglomeration process. In this segment operate either small or large steel groups, which need to find an alternative to lump ore, because soon there will be only iron ore in the form of sinter feed and pellet feed. The charcoal blast furnaces always emulated the technology used by blast furnace coke, however, in this case one can not directly adopt the most economical solution found by them, ie sintering. Unlike steel plants based on coke, charcoal blast furnaces work with low basicity ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) and, the use of large amounts of high-basicity sinter will result in high amount of slag, resulting operational difficulties. In this study we aimed to characterize the sinter iron ore to be used in blast furnaces that have charcoal as a reducer. The tests were performed on a bench, producing sinteres covering the basicity range of 1.0 to 1.8. For each basicity was determined cold strength, the reducibility index, the rate of degradation under reduction, and the required quantity of coal. The best results was achieved with the basicity of 1.2. After characterizing the sinter as a function of basicity, tests were made to determine the influence of the powder dragged by the blast furnace gas, rolling mill scale and iron ore dust (from dedusting system) in the sinter quality parameters. These tests demonstrate that the use of 4% mill scale does not affect the quality of the sinter. However, the powders affect the yield of sintering. It was noted that the iron ore powder affects the reducibility index. However, the residues tested did not affect the cold resistance to cold and degradation index under reduction of sinter. To mitigate the negative effects, it was necessary to use a process of micro pelletization before the sintering process, and adjust the maximum amount of waste disposal and also the amount of fuel.

**Key words:** sinter, low basicity, charcoal, iron ore, waste disposal.

# Sumário

<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>V</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Lista de Símbolos, Abreviaturas e Termos Técnicos.....</b>	<b>X</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Objetivos Específicos .....</b>	<b>4</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
<b>3.1 A Produção de Ferro-Gusa .....</b>	<b>5</b>
<b>3.2 Resíduos Gerados na Siderurgia.....</b>	<b>6</b>
3.2.1 Resíduos Gerados na Siderurgia e Legislação Vigente .....	6
3.2.2 Destinação dos Resíduos .....	9
3.2.2.1 Destinação das Escórias .....	9
3.2.2.2 Destinação do Pó de Forno Elétrico .....	10
3.2.2.3 Destinação da Carepa .....	10
3.2.2.4 Destinação do Pó do Balão e Lama do Alto-forno.....	11
3.2.2.5 Destinação de Finos de Minério e Carvão Vegetal .....	11
<b>3.3 Processos de Aglomeração.....</b>	<b>12</b>
<b>3.4 - O Processo de Sinterização .....</b>	<b>13</b>
3.4.1 - Mecanismos de Sinterização .....	17
3.4.2 - Reações na Sinterização .....	18
<b>3.5 - Qualidade do Sínter .....</b>	<b>21</b>
3.5.1 – Resistência a Frio do Sínter .....	22
3.5.2 – Degradação sob Redução (RDI) .....	24

3.5.3 – Redutibilidade.....	25
3.5.4 - Propriedades a Altas Temperaturas.....	26
<b>3.6 - Combustível para Sinterização.....</b>	<b>29</b>
<b>3.7 - Processo de Pelotização.....</b>	<b>30</b>
<b>3.8 – Planejamento de Experimento.....</b>	<b>31</b>
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>33</b>
<b>4.1 Materiais.....</b>	<b>33</b>
<b>4.2 Pesagem dos Materiais a Sinterizar e do Sínter Produzido.....</b>	<b>33</b>
<b>4.3 Caracterização dos Materiais Utilizados na Sinterização.....</b>	<b>33</b>
4.3.1 Análise Química e Termofísica.....	34
4.3.2 Distribuição Granulométrica dos Materiais a Sinterizar.....	34
<b>4.4 Mistura e Sinterização da Matéria-prima.....</b>	<b>35</b>
4.4.1 Mistura.....	35
4.4.2 Sinterização.....	35
<b>4.5 Plano para Produção do Sínter.....</b>	<b>37</b>
4.5.1 Primeira Etapa: Produção e Caracterização do Sínter em Diferentes Basicidades.....	37
4.5.2 Segunda Etapa: Influência do Pó do Balão, Carepa e Pó de Minério.....	37
4.5.3 Planejamento de Experimento.....	38
<b>4.6 Caracterização do Sínter Produzido.....</b>	<b>39</b>
4.6.1 Ensaio de Queda – Teste Shatter.....	39
4.6.2 Análise Química do Sínter.....	39
4.6.3 Índice de Redutibilidade.....	40
4.6.4 Índice de Degradação sob Redução (RDI).....	40
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>41</b>
<b>5.1 Primeira Etapa: Produção e Caracterização do Sínter em Diferentes Basicidades.....</b>	<b>41</b>
5.1.1 Primeira Tentativa de Produzir e Caracterizar o Sínter em Função da Basicidade.....	41

5.1.2 Segunda Tentativa de Produzir e Caracterizar o Sínter em Função da Basicidade .....	45
5.1.2.1 O Rendimento da Sinterização .....	48
5.1.2.2 Análise Química das Amostras de Sínter .....	49
5.1.2.3 A Resistência Mecânica a Frio .....	51
5.1.2.4 Índice de Redutibilidade .....	52
5.1.2.5 Índice de Degradação sob Redução (RDI) .....	53
5.1.3 Escolha do Valor de Basicidade do Sínter .....	53
<b>5.2 Segunda Etapa: Influência do Pó do Balão, Carepa e Pó de Minério .....</b>	<b>56</b>
5.2.1 Resultados Obtidos .....	58
5.2.2 Influência dos Resíduos no Rendimento da Sinterização .....	58
5.2.2 Influência dos Resíduos na Resistência a Frio do Sínter .....	60
5.2.3 Influência dos Resíduos na Redutibilidade do Sínter .....	62
5.2.4 Influência dos Resíduos no RDI do Sínter .....	64
5.2.5 Correções no Processo e no Leito de Sinterização Para Uso dos Resíduos .....	65
5.2.6 Análise dos Resultados após Correções no Processo e no Leito de Sinterização Para Uso dos Resíduos .....	67
5.2.6.1 Rendimento da sinterização após Correções .....	68
5.2.6.2 Resistência a frio após Correções .....	68
5.2.6.3 Índice de Redutibilidade após Correções .....	69
5.2.6.4 Índice de Degradação sob Redução após Correções .....	69
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>70</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>72</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>73</b>
<b>Apêndice 1 - Folha de dados da Primeira Etapa/ Segunda Tentativa de Caracterizar o Sínter em Função da Basicidade .....</b>	<b>76</b>

<b>Apêndice 2 - Folha de dados da Segunda Etapa: Influência do Pó de Balão, Carepa e Pó de Minério .....</b>	<b>77</b>
<b>Anexo 1 – Legislação Ambiental .....</b>	<b>78</b>

## Lista de Figuras

Figura 3.1 – Fluxograma da geração de resíduos em um alto-forno a carvão vegetal. Fonte ArcelorMittal. ....	7
Figura 3.2 – Esquema do processo de sinterização. Fonte: ArcelorMittal. ....	15
Figura 3.3 – Ignição e movimentação da frente de combustão durante a sinterização (MOURÃO, 2007). ....	15
Figura 3.4 - Microestrutura ideal do sinter de minério de ferro (adaptada por VIEIRA <i>et al.</i> , 2003). ....	17
Figura 3.5 - Mecanismo de formação mineral no processo de sinterização (DAWSAN, 1993b). ....	20
Figura 3.6 – Influência da basicidade na resistência do sinter (FEDORENKO <i>et al.</i> , 1970). .	23
Figura 3.7 – Influência da basicidade na resistência a frio do sinter (MALYSHEVA <i>et al.</i> , 2007) ....	23
Figura 3.8 – Tenacidade à fratura de um compósito, a partir das fases minerais do sinter, como função do RDI (LOO <i>et al. apud</i> DAWSAN, 1993 b). ....	24
Figura 3.9 – Relação entre o índice de redutibilidade e o teor de FeO (LOO, 1998). ....	25
Figura 3.10 – Redutibilidade do sinter versus a basicidade (MALYSHEVA <i>et al.</i> , 2007). ....	26
Figura 3.11 – O processo do alto-forno. Fonte: ArcelorMittal. ....	27
Figura 3.12 – Detalhe da zona de amolecimento e fusão (CAMPOS <i>apud</i> MOURÃO, 2007). ....	28
Figura 3.13 – Influência da basicidade na faixa de temperatura de amolecimento do sinter (MALYSHEVA, 2007). ....	29
Figura 3.14 – Velocidade da frente de combustão (ffs) versus logaritmo natural da reatividade (r) do combustível (LOVEL <i>et al.</i> , 2009). ....	30

Figura 3.15- Diagrama do sistema de pelotização (MOURÃO, 2007). .....	31
Figura 4.1 – Foto do equipamento de sinterização em bancada .....	35
Figura 4.2 – Desenho de fabricação (vista frontal) da sinterização em bancada.....	36
Figura 5.1 – %FeO encontrado nas amostras na primeira etapa/primeira tentativa de caracterizar o sinter em função de sua basicidade. ....	43
Figura 5.2 – Correlação entre a basicidade e a resistência a frio do sinter na primeira etapa/primeira tentativa, afetada pela variabilidade do teor de FeO das amostras. ....	44
Figura 5.3 – Correlação entre o % FeO e a resistência a frio do sinter na primeira etapa/primeira tentativa. ....	44
Figura 5.4 – Amostra do primeiro sinter produzido em bancada .....	46
Figura 5.5 – Rendimento da sinterização considerando a quantidade de carvão utilizada. ....	48
Figura 5.6 – Rendimento da sinterização, curva ajustada. ....	49
Figura 5.7 – %FeO encontrado nas amostras na primeira etapa/segunda tentativa de caracterizar o sinter em função de sua basicidade. ....	49
Figura 5.8 – %FeO médio encontrado para cada quantidade de carvão vegetal utilizada na segunda tentativa de caracterizar o sinter em função de sua basicidade. ....	50
Figura 5.9 – %Fe em função da basicidade, primeira etapa/segunda tentativa. ....	50
Figura 5.10 – Correlação entre a basicidade e a resistência a frio do sinter na primeira etapa/segunda tentativa (%FeO médio = 13,84%) .....	51
Figura 5.11 – Correlação entre a basicidade e o índice de redutibilidade do sinter na primeira etapa/segunda tentativa. ....	52
Figura 5.12 – Correlação entre a basicidade e o RDI na primeira etapa/segunda tentativa. ....	53
Figura 5.13 – Características dos minérios de ferro em uso na ArcelorMittal Juiz de Fora (Onde TJC, MIB, MTM e VGR são minérios de ferro de origens diferentes). ....	54

Figura 5.14 – Fluxograma do processo inicial de sinterização usando Carepa, Pó do Balão e Pó de minério.....	57
Figura 5.15 – Pareto de efeitos de fatores e interações influentes no rendimento da sinterização. ....	59
Figura 5.16 – Influência do pó de minério e do pó de balão na sinterização. ....	59
Figura 5.17 – Pareto de efeitos de fatores e interações influentes na resistência a frio do Sínter.....	61
Figura 5.18 – Representação gráfica da interação ABC na resistência a frio. ....	61
Figura 5.19 – Pareto de efeitos de fatores e interações influentes na Redutibilidade do sínter. ....	62
Figura 5.20 – Influência do pó de minério na redutibilidade do sínter. ....	63
Figura 5.21 – Percentual de FeO obtido no Planejamento de Experimentos. ....	64
Figura 5.22 – Pareto de efeitos de fatores e interações no índice de degradação sob redução (RDI).....	64
Figura 5.23 – Representação gráfica da interação ABC no RDI do sínter.....	65
Figura 5.24 – Fluxograma do processo de sinterização alterado, com a inclusão da etapa de micropelotização.....	66
Figura 5.25 – Micro-pelotas produzidas com o pó do balão, pó de minério e cal.....	66

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Resíduos sólidos inventariados em Minas Gerais – Fonte: FEAM (2011). .....	3
Tabela 2 – Resíduos sólidos gerados nos altos fornos e laminação de interesse para o processo de sinterização (ArcelorMittal Juiz de Fora).....	12
Tabela 3 – Carga metálica usada em altos-fornos.Fonte: Mourão (2008).....	13
Tabela 4 – Descrição dos tipos e tamanhos das partículas do sinter feed (VIEIRA <i>et al.</i> , 2003) .....	14
Tabela 5 – Fatores influentes na formação de ferrita de cálcio .....	21
Tabela 6 – Exemplo de um planejamento de experimento fatorial completo $2^k$ , com $k=2$ (WERKEMA e AGUIAR, 1996).....	32
Tabela 7 – Métodos de análises das matérias-primas e do sinter produzido. ....	34
Tabela 8 – Planejamento de experimento fatorial completo $2^3$ .....	38
Tabela 9 – Composição química dos materiais disponíveis para primeira etapa/primeira tentativa.....	41
Tabela 10 – Materiais usados na primeira etapa/primeira tentativa de sinterização. ....	42
Tabela 11 – Análise química dos sínteres produzidos na primeira etapa/primeira tentativa. ..	42
Tabela 12 – Composição química dos materiais disponíveis para a primeira etapa/segunda tentativa.....	45
Tabela 13 – Distribuição granulométrica dos materiais disponíveis para a primeira etapa/segunda tentativa. ....	45
Tabela 14 – Quantidade de finos de carvão vegetal ser utilizado na primeira etapa/segunda tentativa.....	47
Tabela 15 – Leito de sinterização para a primeira etapa/segunda tentativa. ....	47
Tabela 16 – Resumo para a escolha da basicidade do sinter.....	55

Tabela 17 – Composição química dos materiais disponíveis para a segunda etapa de sinterização.....	56
Tabela 18 – Distribuição granulométrica dos materiais disponíveis para a segunda etapa de sinterização.....	56
Tabela 19 – Leito de sinterização para a segunda etapa de sinterização.....	57
Tabela 20 – Resultados obtidos no planejamento de experimento fatorial completo $2^3$ .....	58
Tabela 21 – Leito de sinterização alterado na tentativa de melhorar o rendimento e o índice de redutibilidade. ....	67
Tabela 22 – Resultados obtidos após ajustes no processo e leito de sinterização.....	68

## Lista de Símbolos, Abreviaturas e Termos Técnicos

Aciaria LD	A produção do aço é feita através do sopro de oxigênio no metal líquido por meio de uma lança, reduzindo o teor de elementos susceptíveis a oxidação. A sigla LD é uma homenagem as cidades austríacas Linz e Donawitz, onde este processo foi utilizado inicialmente.
Basicidade	Relação entre a quantidade de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ). Esta relação também é referenciada como basicidade binária.
Coque <i>breeze</i>	Finos de coque com tamanho inferior a 10 mm.
Fator (A, B e C)	Uma variável deliberadamente alterada em um experimento, com o objetivo de se observar seu impacto na variável resposta. Neste trabalho os fatores A, B e C representam o uso dos resíduos: pó de minério, carepa e pó do balão, respectivamente.
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais.
GAF	Gás de alto-forno, com aproximadamente 55% $\text{N}_2$ , 20% $\text{CO}$ , 20% $\text{CO}_2$ e 5% $\text{H}_2$ .
<i>Hematitinha</i>	Termo usado no mercado de minério de ferro quando o tamanho das partículas encontram-se na faixa de 6,3 a 19 mm. Este tipo de minério granulado é normalmente usado em pequenos altos fornos.
Interação ABC	Influência causada na variável resposta em um experimento, pelos fatores A, B e C. Neste trabalho, trata-se da influência do uso em conjunto do pó de minério, carepa e pó do balão (respectivamente A, B e C).
IR	Índice de redutibilidade, expressa a capacidade do sinter ou minério de ferro ceder oxigênio ao gás redutor.
Minério de ferro granulado	Minério de ferro cujo tamanho das partículas estão compreendidas entre 19 e 50 mm, usado como parte da carga de altos-fornos de maior porte.
Moinha de carvão vegetal	Finos de carvão vegetal com tamanho inferior a 9,5 mm.
Nível	Um valor específico para um fator quantitativo, em um planejamento de experimento.
Pellet feed	Finos de minério de ferro, possui tamanho máximo de 0,1 mm. Material usado para a produção de pelotas.

Pó de balão	Também conhecido como pó do coletor. É o pó seco capturado no sistema de limpeza dos gases do alto-forno, não obstante, alguma umidade possa ser adicionada durante a sua descarga do coletor.
RDI	Índice de degradação sob redução. Quanto menor este índice melhor o desempenho do sinter ou minério de ferro no alto-forno.
SFCA	“ <i>Silicoferrites of calcium and aluminium</i> ”. Ferrita de cálcio contendo alguma sílica e alumina.
Sinter feed	Finos de minério de ferro, possui tamanho entre 0,1 e 6,3 mm. Material usado para a produção de sinter.
TGA	Analizador termogravimétrico. Usado para determinar umidade, carbono fixo e teor de cinzas contido em uma amostra de carvão vegetal.
TMP	Tamanho médio da partícula. Obtido através da curva de distribuição granulométrica.
Variável Resposta	Uma variável observada ou medida em um experimento. Frequentemente é uma característica de qualidade ou uma medida de desempenho.
Variável ruído	Uma variável que pode afetar uma variável resposta em um experimento, mas que não é de interesse como um fator.
Volume de escória	Quantidade de escória, no alto-forno, por tonelada de gusa produzida.

# 1 INTRODUÇÃO

O alto-forno é um dos equipamentos mais antigos e atualmente o mais empregado para a produção de ferro gusa através da redução do minério de ferro e, segundo Mourão (2003), o alto-forno certamente sobreviverá no terceiro milênio, pois altos-fornos modernos podem produzir gusa a custos bastante competitivos em relação às novas tecnologias, como os processos Corex e Finex<sup>1</sup>.

Os primeiros altos-fornos surgiram na Europa por volta do século XIV. Utilizavam minério de ferro granulado e carvão vegetal para a produção do ferro gusa. O carvão vegetal foi sendo substituído gradativamente por coque devido à crescente demanda e esgotamento das florestas (JACOMINO, 2002). Posteriormente, o minério de ferro granulado foi sendo substituído por finos aglomerados em processo como sinterização e pelletização (MOURÃO, 2007). Atualmente, quase a totalidade de altos-fornos no mundo usa coque, com uma combinação de sinter, pelotas e minério granulado (MOURÃO, 2008). Contudo, no Brasil, devido à escassez de carvão mineral de boa qualidade, à abundância de área para plantio de eucalipto, e ainda por existir reservas de minério granulado de boa qualidade, muitos altos-fornos de pequeno porte utilizam carvão vegetal e minério de ferro granulado como matéria-prima, sendo uma alternativa interessante em termos de custo (SAMPAIO, 2008).

Embora tenha tido uma sobrevida maior em Minas Gerais, o minério de ferro granulado está se tornando mais escasso, e chegará a sua extinção na próxima década (MOURÃO, 2008), o que impacta diretamente na atividade dos altos-fornos a carvão vegetal, pois restará apenas minério de ferro na forma de *sinter feed* e *pellet feed*. Uma possível solução é tomar um dos caminhos utilizados pelos altos-fornos de grande porte, ou seja, a

---

<sup>1</sup> Ao contrário do Alto-forno, o processo Corex permite o uso de diversos tipos de carvão não coqueificáveis, e o processo Finex permite o uso de finos de minério sem a necessidade de aglomeração.

aglomeração. Os processos de aglomeração consagrados para a siderurgia a coque são a pelotização e sinterização. No entanto, poucos estudos existem para a siderurgia a carvão vegetal, que em boa parte adapta as tecnologias desenvolvidas para os grandes altos-fornos a coque. Há pouco conhecimento e estudo científico realizado nesta área, sendo necessários mais experimentos fundamentais (SAMPAIO, 2008).

A produção de sinter para altos-fornos a carvão vegetal exige cuidados adicionais, pois de acordo com Dawson (1993b), para que o sinter tenha características adequadas de redutibilidade e boa resistência a degradação, o seu índice de basicidade (relação  $\text{CaO/SiO}_2$ ) deve ser maior ou igual a 1,8, o que é incompatível com a basicidade praticada em altos-fornos a carvão vegetal. Nestes fornos a basicidade fica bem abaixo de 1,0 para facilitar a remoção de álcalis, que são introduzidos pelo próprio carvão vegetal (JACOMINO, 2002). Tal diferença entre os índices de basicidades acarretará num grande volume de escória, o que é indesejável para a sua boa operação. Tal problema não é relevante no uso de pelotas, pois estas podem ser produzidas com basicidade na faixa de 0,33 a 0,78 com boas propriedades físicas e metalúrgicas (UMADEVI *et al.*, 2011). No entanto, devido aos custos de concentração do *pellet feed* e do processo de pelotização, as pelotas são mais caras quando comparadas ao sinter e ao minério granulado (SUSAKI, 2008).

Dessa forma, verifica-se a necessidade da determinação de uma nova composição para a carga metálica que irá alimentar os altos-fornos a carvão vegetal, na qual o sinter terá o papel mais importante. E para o uso deste, necessita-se determinar o valor mínimo de sua basicidade de forma a atender os requisitos de redutibilidade, resistência à degradação e quantidade de escória gerada.

No entanto, tão importante quanto achar uma alternativa para o minério de ferro granulado, é garantir a destinação adequada aos resíduos gerados na siderurgia, em acordo com a crescente preocupação social relacionadas a preservação dos recursos naturais, a fim de

possibilitar que as gerações futuras não sejam prejudicadas pela falta de medidas preventivas e corretivas tomadas pela geração atual, uma vez que os recursos naturais não são infinitos. Muita atenção foi chamada para este assunto, fazendo com que legislação específica e rigorosa sobre o assunto fosse criada a fim de proteger o meio ambiente, impondo as indústrias a utilização racional dos recursos naturais. Neste sentido, a produção o sinter é uma oportunidade viável para a destinação adequada de resíduos produzidos na siderurgia. Resíduos portadores de ferro ou carbono podem ser sinterizados juntamente com os finos de minério de ferro, evitando a necessidade de armazená-los em pátios dispendiosos adequadamente construídos para evitar danos ao meio ambiente.

De acordo com inventário de resíduos sólidos industriais realizado pela Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM, 2011) a indústria siderúrgica e metalúrgica de Minas Gerais gera anualmente grande quantidade de resíduos, os quais necessitam em sua maioria encontrar destinação adequada ao meio ambiente e financeiramente mais interessante. Na Tabela 1 são apresentados os principais resíduos sólidos inventariados em 2010 em Minas Gerais.

Tabela 1 – Resíduos sólidos inventariados em Minas Gerais – Fonte: FEAM (2011).

<b>Resíduo</b>	<b>Geração anual (t)</b>
Escória de alto-forno	3.717.182,89
Resíduos de sistemas de controle de emissão gasosa (precipitadores, filtro de mangas, entre outros)	874.470,22
Finos de minério de ferro	189.090,85
Lama de lavagem dos gases dos altos-fornos	51.406,93
Pó de coletor - pó de balão	21.070,52
Carepa	24.073,76

## 2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo a produção e a caracterização do sinter de minério de ferro obtido pela sinterização de finos de minério de ferro e de resíduos gerados em uma planta siderúrgica, adequado para a utilização em altos fornos a carvão vegetal em substituição a *hematitinha*<sup>2</sup>.

### 2.1 Objetivos Específicos

- Determinar a basicidade ideal para o sinter, produzido a partir de uma mistura com teor de sílica acima de 6%, visando-se obter o menor volume de escória no alto-forno a carvão vegetal;
- Determinar a quantidade de carepa de laminação, pó de minério do sistema de despoeiramento e pó do balão que poderá ser usado para a produção do sinter.

---

<sup>2</sup> Minério de ferro hematítico cujo tamanho das partículas esteja na faixa de 6,3 a 19 mm.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 A Produção de Ferro-Gusa

Na natureza o ferro encontra-se associado a outros elementos, principalmente ao oxigênio, destacando-se a hematita e a magnetita, cujas fórmulas são  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , respectivamente. A redução do óxido de ferro pelo homem aconteceu por acaso quando as pedras utilizadas para delimitar as fogueiras mudavam de propriedade com o tempo, ou seja, o óxido de ferro era reduzido pela ação do carbono contido na madeira queimada e pelo calor gerado. O processo de redução do minério de ferro foi evoluindo com o tempo, mas a base sempre foi o uso de carvão para gerar calor e servir de agente redutor (JACOMINO, 2002).

Com o aparecimento de leis restringindo a devastação de florestas, impostas principalmente pelo governo inglês, passou-se a utilizar o carvão mineral, cuja viabilidade do uso foi atingida, através do processo de coqueificação. Por volta de 1708, o primeiro gusa foi feito a partir de coque, que pouco a pouco foi dominando a produção de gusa no mundo. No entanto, no Brasil, a siderurgia a carvão vegetal persiste até os dias atuais, havendo assim, duas classes de altos-fornos. A primeira é a dos altos-fornos a carvão vegetal, de menor porte, destinados à produção de “pães de gusa” e/ou fornecimento de gusa líquido as etapas seguintes de produção de aço. A segunda classe é a dos altos-fornos a coque, de grande porte, das usinas integradas (SUSAKI, 2008).

Apesar da utilização do carvão vegetal em altos-fornos representar apenas 1% da produção de ferro gusa no mundo, no Brasil este valor chega a 30 % (SAMPAIO, 2008), sendo, portanto um importante setor para a economia, principalmente em Minas Gerais onde a produção de ferro-gusa usando carvão vegetal se destaca no cenário nacional (JACOMINO, 2002).

Estudos mostram que em breve a produção de gusa via altos-fornos a carvão vegetal será afetada, pois a produção do minério de ferro granulado diminuirá, paulatinamente, até a sua quase extinção, na próxima década. Os minérios lavrados terão mais e mais parcelas de itabiritos, o que aumentará custos e a geração de finos tipo *sinter feed* e *pellet feed*. (MOURÃO, 2008). Tal fato implica na determinação de uma carga metálica substituta do minério granulado, como por exemplo sínter, mas que deve ser produzido com as características adequadas a altos-fornos a carvão vegetal.

## **3.2 Resíduos Gerados na Siderurgia**

Tão importante quanto encontrar uma carga metálica substituta para a *hematitinha*, é também destinar corretamente os resíduos gerados no processo de produção do ferro gusa e em processos subsequentes na produção do aço.

### **3.2.1 Resíduos Gerados na Siderurgia e Legislação Vigente**

Além do ferro gusa, altos-fornos a carvão vegetal geram resíduos sólidos desde a preparação da carga até o sistema de limpeza de gases, conforme demonstrado na Figura 3.1.

Durante a preparação da carga para o enforamento, o minério de ferro e o carvão vegetal são peneirados, gerando resíduos na forma de finos de minério de ferro, finos de carvão vegetal (ou moinha), pó de minério de ferro e pó de carvão vegetal. Sendo estes dois últimos coletados pelos sistemas de despoeiramento.

A escória é formada pela fusão da ganga, ou seja, impurezas, principalmente na forma de sílica e alumina, que normalmente acompanha o minério de ferro a ser reduzido. Devido a estas impurezas são acrescentados os fundentes, que são usados no objetivo de se obter uma escória com basicidade compatível aos altos-fornos a carvão vegetal e com o menor ponto de fusão.

O gás do alto-forno (GAF), oriundo da reação do ar de sopro com o carbono presente na carga, arrasta consigo considerável quantidade de poeira. A retirada desta é feita em dois estágios. No primeiro estágio, 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. No segundo estágio, 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).

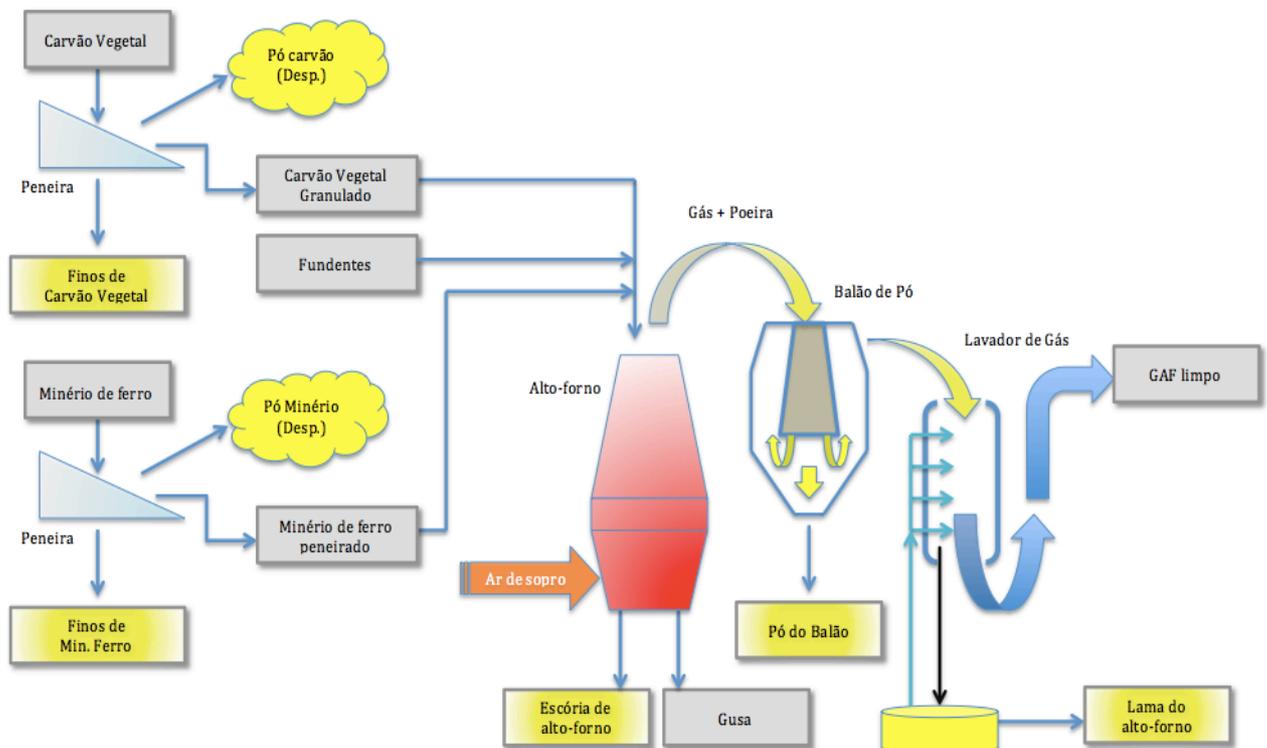


Figura 3.1 – Fluxograma da geração de resíduos em um alto-forno a carvão vegetal. Fonte ArcelorMittal.

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 panela, carepa de lingotamento contínuo e carepa de laminação a quente (ASSUNÇÃO, 2008).

As leis brasileiras que tratam do meio ambiente estão entre as mais avançadas e completas do mundo, abrangendo seis tipos diferentes de crimes ambientais: crimes contra a fauna, crimes contra a flora, poluição, crimes contra o ordenamento urbano e o patrimônio cultural, crimes contra a administração ambiental e infrações administrativas. Trata-se de uma legislação consolidada, onde as infrações são claramente definidas, havendo uniformidade e gradação adequadas. Tanto pessoa jurídica quanto física pode ser penalizada. Empresas podem até mesmo ser liquidadas, caso se comprove que foi criada para facilitar um crime ambiental, mas a punição pode ser extinta quando for comprovada a recuperação ambiental.

O anexo II da Resolução CONAMA n° 420/2009 (BRASIL, 2009) estabelece lista de valores orientadores para solos e para águas subterrâneas. As sanções penais e administrativas para o não cumprimento dos limites estipulados implicam em até quatro anos de reclusão, conforme Art. 54 da Lei n° 9.605/98 (BRASIL, 1998). Ainda, de acordo com o Código Penal (BRASIL, 1941), a pena pode chegar a quinze anos caso seja constatado envenenamento de água potável. As multas variam de R\$ 5.000,00 (cinco mil reais) a R\$ 50.000.000,00 (cinquenta milhões de reais), conforme Art. 61 do Decreto 6.514, de 22 de julho de 2008 (BRASIL, 2008). O Anexo 1 traz a reprodução de trechos da Legislação Ambiental detalhando as penas e multas para crimes ambientais.

Alguns dos resíduos gerados na siderurgia, como os finos de minério e de carvão vegetal, têm valor comercial e podem ser vendidos no mercado, ainda que o valor obtido na venda seja muito inferior ao pago na compra. No entanto, a maior parte dos resíduos não possui valor de venda e precisam ser armazenados de forma adequada em dispendiosos pátios construídos para não provocar danos ao meio ambiente. Portanto, um processo que garanta a destinação adequada dos resíduos, além de favorecer o meio ambiente, evitará o risco de penalidades a empresa e seus gestores e também se constituirá em uma forma de reduzir custos, pois os resíduos poderão ser usados como matéria-prima.

### **3.2.2 Destinação dos Resíduos**

Muitos dos resíduos citados no item anterior podem ser reaproveitados nos altos-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;
- Granulometria.

As escórias de alto-forno e aciaria, pó do forno elétrico e lama do alto-forno não são de interesse, pois não atendem as restrições acima, o que será discutido a seguir.

#### **3.2.2.1 Destinação das Escórias**

As escórias de aciaria e de alto-forno, não são de interesse para a sinterização devido a sua composição química, que é rica em elementos indesejáveis e pobre em ferro e carbono. No entanto, existe destinação adequadas para elas. As escórias de alto-forno quando passam pelo processo de granulação, no qual um jato de água transforma a escória líquida em um sólido amorfo particulado, podem ser destinadas a produção de cimento. Já as escórias de aciaria, após o processamento adequado, podem ser usadas na pavimentação rodoviária ou como lastro ferroviário (ASSUNÇÃO, 2008).

As escórias de forno panela, com teor de cal superior a 50%, pode ser reaproveitada no próprio processo siderúrgico (OLIVEIRA E. e MARTINS, 2003) inclusive na sinterização como fonte de CaO.

### **3.2.2.2 Destinação do Pó de Forno Elétrico**

O pó do forno elétrico apresenta a desvantagem de conter zinco, oriundo do revestimento de materiais metálicos que viraram sucatas. O zinco é maléfico ao alto-forno devido ao seu baixo ponto de fusão e ebulição, o que faz com que ele não saia de dentro do alto-forno, pois ao chegar as partes inferiores ele entra em ebulição e sobe arrastado pelos gases e, ao atingir as partes superiores ele condensa e volta a descer junto com a carga. Esta recirculação do zinco causa prejuízos operacionais ao alto-forno, através de incrustações nas paredes e infiltração no refratário (MANTOVANI, 1998). Portanto a utilização do pó do forno elétrico na sinterização está condicionada a se obter um síter 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 (ASSUNÇÃO, 2008).

### **3.2.2.3 Destinação da Carepa**

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 síter (CUNHA *et al.*, 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).

#### **3.2.2.4 Destinação do Pó do Balão e Lama do Alto-forno**

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

O pó do balão, cuja composição química é parecida com o da lama do sistema de lavagem de gases, pode ser usado na sinterização, no entanto, é preciso observar o teor de fenóis, que em alguns casos estão acima do limite admissível de 10 mg/kg. No caso da ArcelorMittal Juiz de Fora o pó do balão pode ser sinterizado pois o teor de fenol está abaixo do referido limite admissível. No entanto, para algumas usinas não integradas a pesquisa conduzida por Oliveira M. e Martins (2003) verificou que o pó de balão deveria ser classificado como resíduo Classe I. 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.

#### **3.2.2.5 Destinação de Finos de Minério e Carvão Vegetal**

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 (JANUZZI, 2008).

Na Tabela 2 são apresentadas as quantidades geradas dos resíduos de interesse para a sinterização na ArcelorMittal Juiz de Fora.

Tabela 2 – Resíduos sólidos gerados nos altos fornos e laminação de interesse para o processo de sinterização (ArcelorMittal Juiz de Fora)

Resíduo	Geração específica (kg/t gusa)
Finos de carvão vegetal (moinha)	170
Pó de carvão vegetal (despoeiramento)	15
Finos de minério de ferro (peneiramento)	400
Pó de minério de ferro (despoeiramento)	40
Pó de balão (limpeza dos gases)	21
Carepa	35

### 3.3 Processos de Aglomeração

Durante as primeiras décadas do século XX, os desenvolvimentos dos altos-fornos eram basicamente melhorias no que já estava bem estabelecido. Porém, grandes avanços foram feitos na preparação do minério de ferro, através da aglomeração destes. Finos de minério de ferro não podem ser utilizados diretamente no alto-forno, devido ao processo de contracorrente no qual os sólidos descem contra o fluxo gasoso ascendente. Se os finos fossem carregados diretamente no alto-forno, a permeabilidade da carga seria reduzida dificultando a passagem dos gases e a operação do alto-forno. Embora muitas tentativas e investimentos têm sido tentadas, pesquisando-se rotas inovadoras, por vezes radicais, para o processamento destes finos, até o presente momento, nenhuma delas foi aprovada e consagrada em caráter industrial (MOURÃO, 2008).

A aglomeração continua sendo largamente usada destacando-se os processos de sinterização e pelotização (LANKFORD et. Al., 1985; MOURÃO, 2007). Enquanto nos altos-fornos a carvão vegetal a carga ferrosa é constituída tipicamente por minério de ferro granulado, nos altos-fornos a coque a carga ferrosa principal é o sinter (DAWSAN, 1993 a), na faixa de 65 a 85%. O restante é composto por minério de ferro granulado e ou pelotas

(SUSAKI, 2008). A quantidade de sinter é limitada por sua basicidade, normalmente em torno de 1,8 , que causa o aumento da quantidade de escória no alto-forno. O uso de minério granulado é interessante pelo seu menor custo, mas está condicionado a sua disponibilidade. A Tabela 3 mostra a carga metálica típica de altos-fornos em várias regiões do mundo.

Tabela 3 – Carga metálica usada em altos-fornos. Fonte: Mourão (2008).

<i>PAÍS</i>	<i>% SÍNTER</i>	<i>% Minério Granulado</i>	<i>% PELOTA</i>
EUA	<b>10</b>	<b>3</b>	<b>87</b>
Países Europeus	<b>65</b>	<b>15</b>	<b>20</b>
Japão	<b>75</b>	<b>20</b>	<b>5</b>
China	<b>75</b>	<b>19</b>	<b>6</b>
Brasil (integradas)	<b>75</b>	<b>20</b>	<b>6</b>
Brasil (altos-fornos a carvão vegetal)	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>0</b>

### 3.4 - O Processo de Sinterização

O processo de sinterização consiste em aglomerar, por fusão incipiente, uma mistura de finos, porém não tão finos (OLIVEIRA E. e MARTINS, 2003), de minério de ferro, de coque ou de carvão vegetal, de fundentes, de sinter de retorno e água. O sinter de retorno compreende os finos gerados durante o processo de sinterização. Além destes materiais, resíduos portadores de ferro, carbono ou cal podem ser sinterizados.

A adição de água é fundamental na formação e crescimento das quase-partículas, pois gera uma tensão superficial que mantém os grãos coesos, denominada de tensão neutra. No entanto esta não é suficiente para manter a coesão das partículas devido a densidade destas e também pela evaporação da água durante o processo de sinterização. Portanto aglomerantes precisam ser adicionados com o objetivo de aumentar a viscosidade da fase líquida dentro dos capilares e propiciar o aparecimento de pontes cerâmicas ou na formação de cálcio-ferritas.

Em complemento a ação do material coloidal que diminui as distâncias entre partículas, aumentando assim, a força de Van der Waals (CASSOLA e MORAES, 2007).

Especial atenção deve ser dada as partículas de minério de ferro, conhecidas como *sinter feed*, que podem ser classificadas como supergrossas, nucleantes, intermediárias, aderentes e superfina. As partículas supergrossas, intermediárias e superfina devem ser minimizadas na composição da mistura. As supergrossas não apresentam a capacidade de aderir às partículas mais finas ao redor e não contribuem para o fenômeno de microaglomeração. Já as partículas intermediárias não se comportam nem como nucleantes e nem como aderentes. Por último, as superfina causam a perda de permeabilidade do leito de sinterização (VIEIRA *et al.*, 2003), mas podem ser usadas desde que estas passem por um processo de micropelotização (PEREIRA, 2004). A Tabela 4 fornece o tamanho e a descrição de cada partícula.

Tabela 4 – Descrição dos tipos e tamanhos das partículas do *sinter feed* (VIEIRA *et al.*, 2003)

<b>Tipo de partícula</b>	<b>Faixa granulométrica (mm)</b>	<b>Descrição</b>
<b>Supergrossas</b>	>6,3	Não apresentam a capacidade de aderir às partículas mais finas ao redor e não contribuem para o fenômeno de microaglomeração
<b>Nucleantes</b>	1,0 – 6,3	Apresenta a capacidade de aderir as partículas mais finas ao redor e constitui-se nos núcleos do aglomerados. Tamanho ideal de 1 até 3mm.
<b>Intermediárias</b>	0,3 – 1,0	Não se comportam nem como nucleantes e nem como aderentes
<b>Aderentes</b>	0,1 – 0,3	Formam a camada aderente ao redor do núcleo microaglomerado.
<b>Superfina</b>	<0,1	Causam a perda de permeabilidade do leito de sinterização. Para serem usadas necessitam ser micropelotizadas.

Os materiais que serão sinterizados são armazenados em silos de onde são extraídos, pesados e conduzidos até um tambor que faz a mistura destes com a adição de água. A mistura é transportada até a esteira de sinterização, onde um maçarico proporciona o início da combustão do coque (ou do carvão vegetal) presente na mistura, com o oxigênio do ar, conforme exemplificado na Figura 3.2.

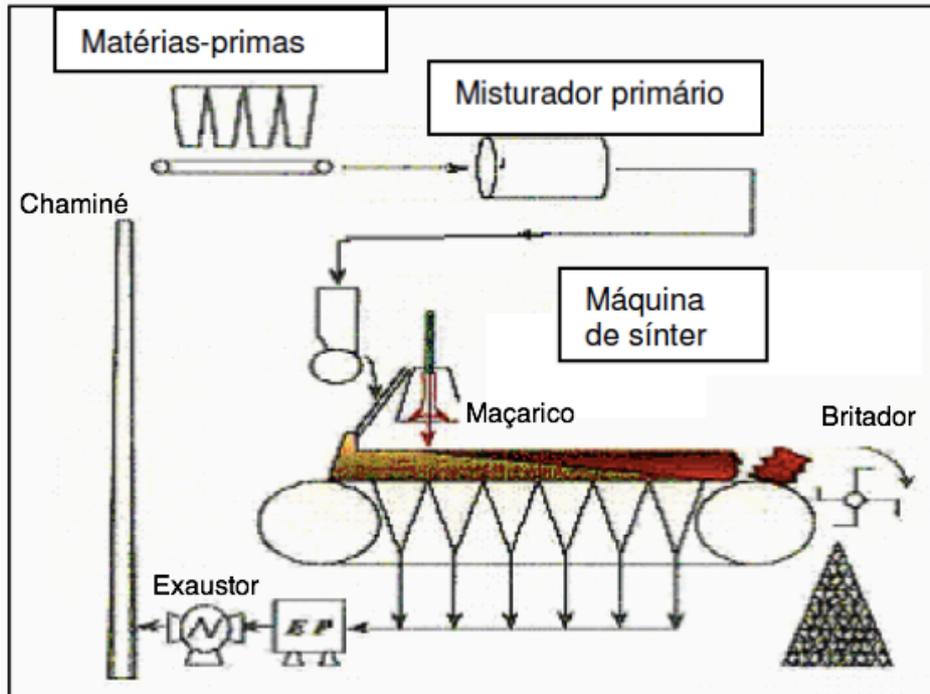


Figura 3.2 – Esquema do processo de sinterização. Fonte: ArcelorMittal.

O ar é sugado na parte de baixo da carga. Uma vez iniciada a ignição na parte superior, a combustão prossegue à medida que o ar entra em contato com as partículas de coque ou carvão vegetal, formando uma frente de combustão. Considerando que a frente de combustão se move de cima para baixo, conforme mostrado na Figura 3.3, o ar frio sugado resfria a parte já sinterizada e é pré-aquecido por esta.

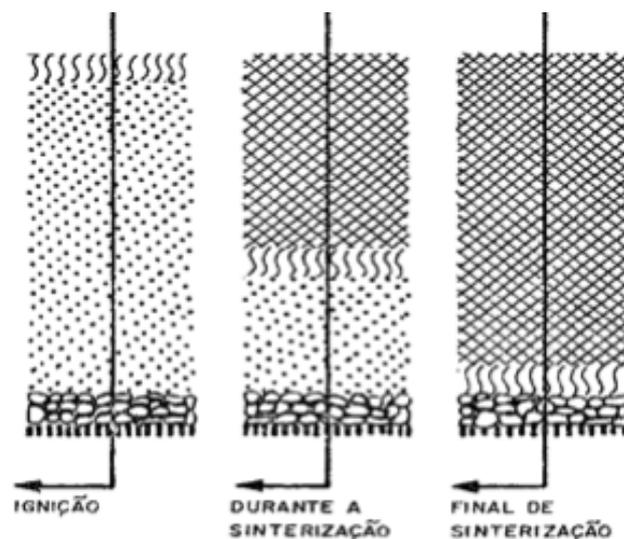


Figura 3.3 – Ignição e movimentação da frente de combustão durante a sinterização (MOURÃO, 2007).

A combustão localizada provoca uma fusão parcial da carga na região mais quente e o gás gerado na combustão pré-aquece a carga logo abaixo. Trata-se, portanto, de um processo com bom rendimento térmico. Mas, que depende de um bom controle de permeabilidade da carga (MOURÃO, 2007).

Considerando a necessidade de aglomerar partículas superfinais, o fluxo mostrado na Figura 3.2 necessita ser alterado, introduzindo neste uma etapa de micropelotização e cobertura das micropelotas com finos de combustível, conforme o processo HPS (Hybrid Pelletized Sinter), cuja primeira planta entrou em operação em 1988 na usina de Fukuyama da NKK Co., Japão (NIWA *et al.*, 1990).

Após o processo de sinterização, o material obtido é quebrado e classificado em peneiras. Os finos são devolvidos ao silos de matéria-prima para sofrerem nova sinterização, enquanto que o sinter é disponibilizado para ser usado no alto-forno.

A temperatura de sinterização é uma variável importante e deve ser tal que seja capaz de provocar a fusão parcial e produzir uma porção de material fundido, que, durante o resfriamento, irá cristalizar ou solidificar em várias fases minerais que fará a ligação da estrutura do sinter. O perfil do aquecimento tem um significativo impacto no tipo de sinter produzido e nas suas propriedades físicas e metalúrgicas. Outros fatores, que também afetam o processo e a qualidade do sinter (DAWSAN, 1993b) são:

- (i) O tamanho e composição das micro-pelotas ou grânulos;
- (ii) A análise química e granulometria da matéria-prima;
- (iii) A composição mineral dos minérios;
- (iv) A proporção relativa de minério de ferro, fundentes e coque utilizado na mistura.

### 3.4.1 - Mecanismos de Sinterização

Sínter consiste de um conjunto de várias fases minerais como hematita, magnetita, ferrita de cálcio, e silicatos de cálcio com uma variada composição química e morfologia. Normalmente ferrita de cálcio contém alguma sílica e alumina e algumas vezes é chamada de SFCA (“*silicoferrites of calcium and aluminium*”).

Dois tipos de estrutura podem ser obtidas dependendo do processo de sinterização, particularmente pela temperatura: estrutura homogênea e heterogênea. A estrutura homogênea possui aparência visual homogênea e é obtida com altas temperaturas de sinterização (>1300°C). Já na estrutura heterogênea, produzida a temperaturas menores, percebe-se significativa quantidade de partículas de *sinter feed* parcialmente fundidas, sem sofrer reações, conforme mostrada na Figura 3.4.

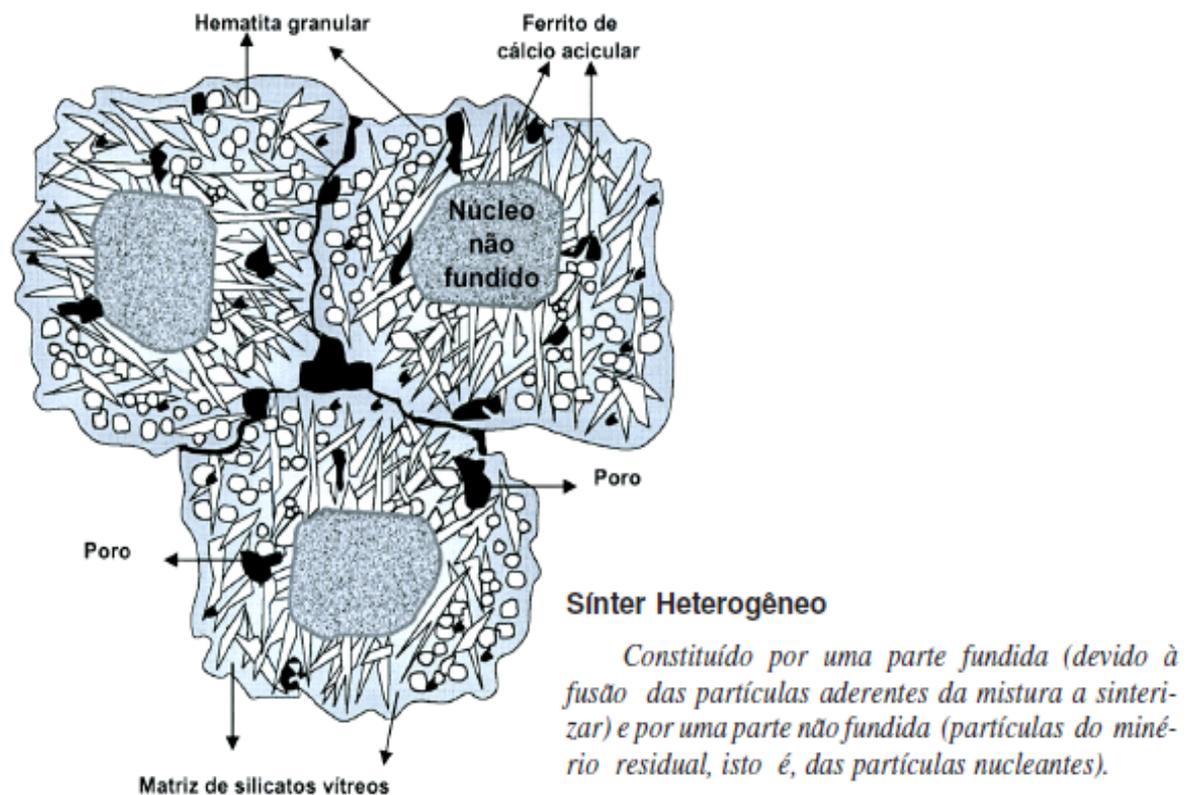


Figura 3.4 - Microestrutura ideal do sínter de minério de ferro (adaptada por VIEIRA *et al.*, 2003).

A textura heterogênea consiste preliminarmente de hematita porosa com ferrita de cálcio acicular em sua borda, é referida na literatura como ótima, pois, segundo Dawsan (1993b), possui:

- (i) Excelentes propriedades de redução (baixa consumo de coque);
- (ii) Boa resistência física;
- (iii) Índice de Degradação sob Redução (RDI) aceitável;
- (iv) Elevadas propriedades de redução e fusão a altas temperaturas.

O perfil térmico em um dado ponto no leito de sinterização reflete em uma série de mudanças físicas e químicas, como evaporação, calcinação e fusão parcial. O calor total em qualquer ponto no processo depende da transferência de calor dos gases, consumo de combustível e das reações exotérmicas e/ou endotérmicas. A temperatura máxima alcançada durante a sinterização depende principalmente da quantidade, localização e reatividade do combustível utilizado. A máxima temperatura alcançada irá determinar o percentual de FeO contido no sinter, o qual deve ser controlado pois influencia diretamente as propriedades do sinter. A redutibilidade aumenta quando o calor fornecido ao processo decresce e o RDI decresce através do resfriamento rápido. A perda de resistência mecânica aumenta abaixo de determinada faixa de calor, ou seja, menor temperatura na frente de sinterização acarreta em menor resistência mecânica. O efeito da temperatura de sinterização na composição mineral revelou que tanto a ferrita de cálcio quanto a hematita primária decresce com o aumento da temperatura acima de 1250°C. Nesta condição, a morfologia da ferrita de cálcio muda de acicular para colunar (DAWSAN, 1993 b).

### **3.4.2 - Reações na Sinterização**

As seguintes reações ocorrem na formação de sinter de minério de ferro:

- (i) Reações em estado sólido: sólido-sólido e sólido-gás;
- (ii) Fusão dos produtos das reações em estado sólido (descritas no item anterior) para formar o líquido primário;
- (iii) Dissolução dos sólidos na porção fundida para formar o líquido secundário;
- (iv) Recristalização das fases minerais a partir dos líquidos formados.

Quando a temperatura cai abaixo de 1100°C o processo está completo (no entanto alguma oxidação da wustita ou magnetita pode ocorrer) (DAWSON, 1993 b).

As Equações de 1 a 14 representam as reações na sinterização.

a) Secagem: até 300°C . Vaporização da água livre.



b) Desidratação: 400 a 500°C. Vaporização da água combinada



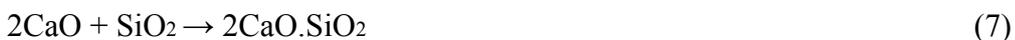
c) Redução superficial do minério de ferro



d) Decomposição de carbonatos: 750 a 1150°C



e) Formação de silicatos: 600 a 1300°C



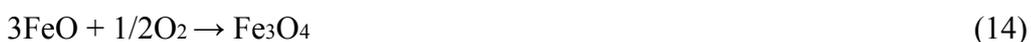
f) Formação de Cálcio-ferritas: 600 a 1300°C



g) Combustão do Coque: 1300°C



h) Formação da magnetita:



Um esquema do processo de formação mineral é apresentado na Figura 3.5. O líquido inicial a ocorrer durante a sinterização deve ser composto de ferrita de cálcio, primeiro desenvolvido como ferrita de monocálcio a uma temperatura de 1192°C. Como a temperatura na frente de sinterização aumenta, este líquido dissolve componentes da ganga e hematita formando ferritas de cálcio complexas (SFCA,  $\text{Ca}(\text{FeAl})_6\text{O}_{10} - \text{Ca}_5\text{Si}_2(\text{FeAl})_{18}\text{O}_{36}$ ). Assumindo que a temperatura não ultrapasse 1275°C ferritas de cálcio acicular serão produzidas (DAWSAN, 1993b).

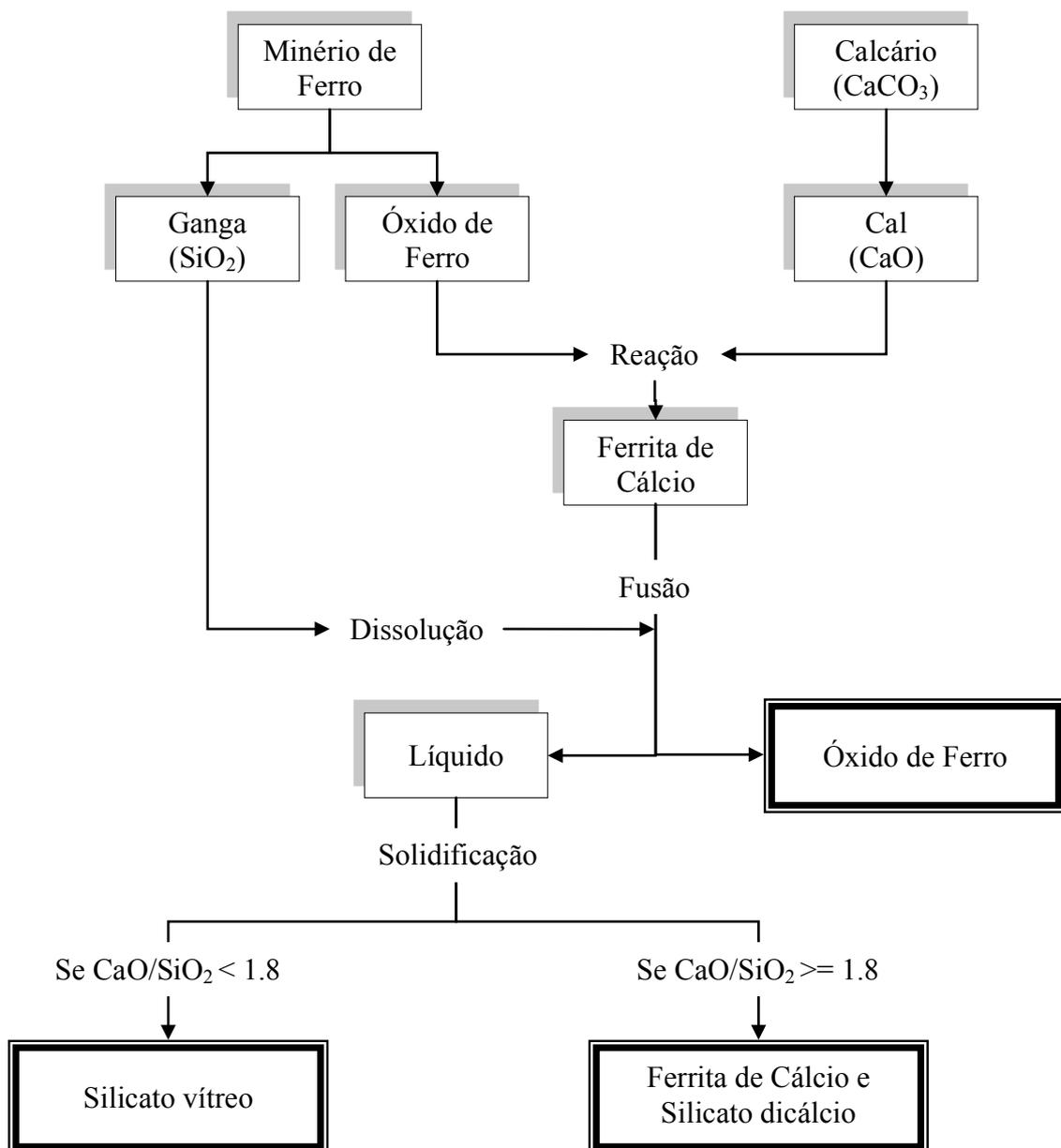


Figura 3.5 - Mecanismo de formação mineral no processo de sinterização (DAWSAN, 1993b).

Durante o ciclo de resfriamento é possível que tanto a hematita quanto a magnetita seja reabsorvida, através de reações com os silicatos em estado líquido, formando SFCA. Este fenômeno é favorecido pela taxa de resfriamento lenta e resulta na formação de maiores quantidades de cristais de SFCA. Em ambiente redutor a magnetita é preservada, no entanto em ambiente oxidante a magnetita forma SFCA. Quanto mais lento o resfriamento mais este fenômeno é observado, e ao contrário, resfriamento rápido tende a formar silicato de cálcio. A viscosidade regula a formação de SFCA, quanto menor a viscosidade menor será a formação de SFCA. Basicamente, pode-se considerar o líquido como um silicato fundido no qual a rede do silicato desempenha importante papel e outros componentes presentes atuam ou como formadores de rede ou modificadores desta.  $Al_2O_3$ , que favorece a formação de SFCA, desempenha o papel de formador de rede, e  $MgO$ , que a inibe, desempenha o papel de modificador de rede. Por outro lado, o aumento da basicidade e também da relação alumina/sílica, favorece a formação de ferrita de cálcio. Para uma basicidade acima de 1,8 ferrita de cálcio e silicato de dicálcio é formado (DAWSAN, 1993b). A Tabela 5 resume os principais fatores influentes na formação de ferrita de cálcio.

Tabela 5 – Fatores influentes na formação de ferrita de cálcio

<i>Fator</i>	<i>Formação de ferrita de cálcio</i>
<b>Maior teor MgO</b>	Menor
<b>Maior temperatura</b>	Menor
<b>Maior relação <math>Al_2O_3 / SiO_2</math></b>	Maior
<b>Maior basicidade (<math>CaO / SiO_2</math>)</b>	Maior

### 3.5 - Qualidade do Sínter

A qualidade do sínter é usualmente definida em termos de:

- (i) Resistência mecânica a frio;

- (ii) Índice de Degradação sob Redução (RDI);
- (iii) Índice de Redutibilidade;
- (iv) Propriedades a altas temperaturas (amolecimento e fusão).

### 3.5.1 – Resistência a Frio do Sínter

A resistência a frio do sínter depende da resistência individual de cada componente mineral, da resistência do aglomerante e da composição mineral. Loo *et al.* (*apud* DAWSAN, 1993 b) estudaram a tenacidade a fratura de várias fases minerais e encontraram a seguinte ordem de queda na resistência do sínter:

Hematita primária > Hematita secundária > Magnetita > SFCA > Fase vítrea.

Kasai *et al.* (*apud* DAWSAN, 1993 b) determinaram que a resistência também pode ser relacionada a fluidez do líquido formado pela camadas de aderência das partículas. Os fatores que mais influenciam a resistência são a composição química da camada aglomerante, o tamanho dos poros e a perda de ignição do núcleo das partículas. Assim, a resistência está relacionada a fração de vazios e a superfície específica do sínter.

A resistência do sínter ainda pode ser afetada pela adição de MgO, e tende a diminuir com aumento da fração deste, devido a mudanças na mineralogia do sínter, no entanto, em casos práticos não foi observado significativa mudança na resistência do sínter aumentado o teor de MgO para 3,4% (DAWSAN, 1993b).

A basicidade do sínter também afeta a resistência à frio, Fedorenko *et al.* (1970) estudaram a variação da resistência à frio do sínter com basicidade entre 0,6 e 3,4. Nestes estudos foi identificado que, partindo-se de uma basicidade natural da carga igual a 0,6, a resistência a frio do sínter diminui com o aumento da basicidade até se atingir um valor mínimo em uma basicidade de 1,4. A partir deste valor a resistência a frio volta a subir de forma acentuada (Figura 3.6). A queda de resistência neste ponto tem sido atribuída a

insuficiente profundidade de reação nos componentes da mistura devido a presença de silicato dicálcio  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  e das múltiplas fases na composição mineralógica do sinter.

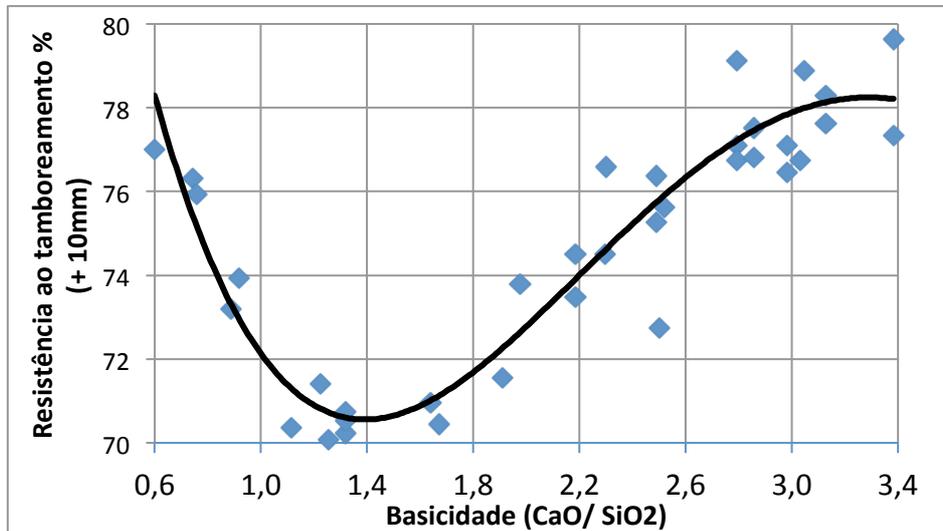


Figura 3.6 – Influência da basicidade na resistência do sinter (FEDORENKO *et al.*, 1970).

Malysheva *et al.* (2007) também estudaram o comportamento anômalo da resistência a frio do sinter<sup>3</sup> (Figura 3.7), comparando ao resultado obtido por Fedorenko *et al.*, pode-se observar que os resultados são bastantes semelhantes, entretanto, Malysheva *et al.* (2007) identificaram uma resistência mínima para o sinter com basicidade de 1,6.

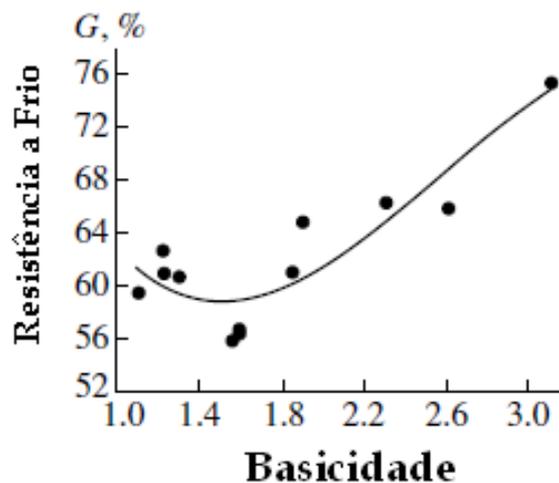


Figura 3.7 – Influência da basicidade na resistência a frio do sinter (MALYSHEVA *et al.*, 2007)

<sup>3</sup> A resistência a frio do sinter foi determinada segundo a norma GOST 15137-77 (Rússia), que descreve o método para determinação da resistência ao tamboreamento de minério de ferro, aglomerados e pelotas.

### 3.5.2 – Degradação sob Redução (RDI)

Este fenômeno surge a partir da baixa temperatura de redução da hematita e, como é de se esperar, está relacionado com a quantidade de hematita presente no sinter, ou mais precisamente das particulares formas de hematita. Já a algum tempo, no Japão, vem se acreditando que sinteres com maior quantidade de hematita secundária romboédrica esqueletiforme estão sujeitos a maior RDI (DAWSAN, 1993 b). No entanto, Loo *et al.* (*apud* DAWSAN, 1993 b), a partir do estudo individual de cada fase mineral e da composição mineral do sinter, determinaram uma forte evidência que o RDI está relacionado a propagação de trincas (Figura 3.8). Como a propagação de trincas diminui com o aumento da porosidade, os poros atuam como obstáculos a propagação de trincas.

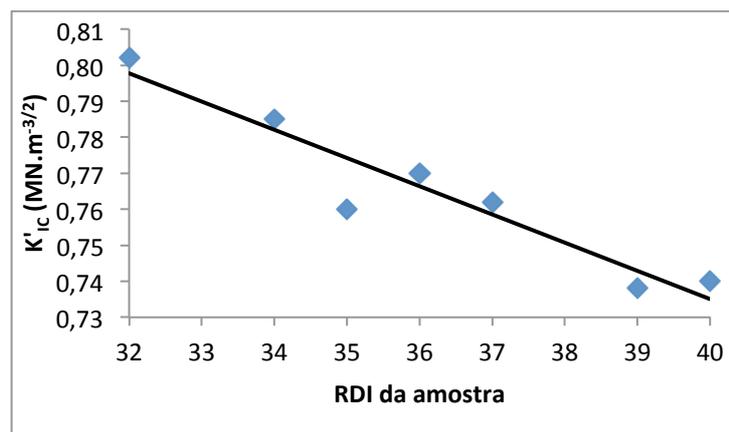


Figura 3.8 – Tenacidade à fratura de um compósito, a partir das fases minerais do sinter, como função do RDI (LOO *et al.* *apud* DAWSAN, 1993 b).

Ainda há uma grande discussão sobre a influência do  $Al_2O_3$  no RDI e nos mecanismos envolvidos. Sabe-se que o aumento da relação  $Al_2O_3/SiO_2$  conduz ao aumento do RDI, no entanto não existe argumento teórico convincente para explicar este fenômeno. Alguns autores acreditam que a presença do  $Al_2O_3$  na hematita pode gerar tensões na magnetita produzida durante a redução, o que levaria ao crescimento de trincas. Para Dawsan (1993 b), as propriedades das fases de ligação são a chave para entender o RDI. Em particular, a resistência da fase vítrea, ou melhor, a sua habilidade de resistir à propagação de trincas.

A presença de MgO no sinter traz um efeito benéfico no RDI, pois aumentando-se a quantidade de MgO, mais magnetita será gerada no sinter, e por conseguinte menos hematita. Como a magnetita sofre menos redução a baixas temperaturas, menor será o RDI (LU *et al.*, 2007).

### 3.5.3 – Redutibilidade

A redutibilidade está relacionada à estrutura mineral e a porosidade do sinter. A redutibilidade das fases minerais presentes no sinter diminui na seguinte ordem:

Hematita > ferrita de cálcio > magnetita > Olivinas ((Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>).

Tanto a hematita quanto a magnetita são rapidamente reduzidas a wustita, mas as taxas de redução diferem na posterior redução de wustita a ferro puro. A partir da hematita, a wustita é reduzida rápida e homoganeamente, mesmo quando parte dela fica cercada de metal. A partir da magnetita, a redução é topoquímica e quase todos os grãos são rapidamente cercados pelo metal que neste caso retarda futuras reações de redução.

Conforme salientado por Loo (1998), o teor de FeO é utilizado como um indicador para os valores dos índices de redutibilidade e RDI. A Figura 3.9 relaciona o índice de redutibilidade com o teor de FeO no sinter para algumas faixas de basicidade.

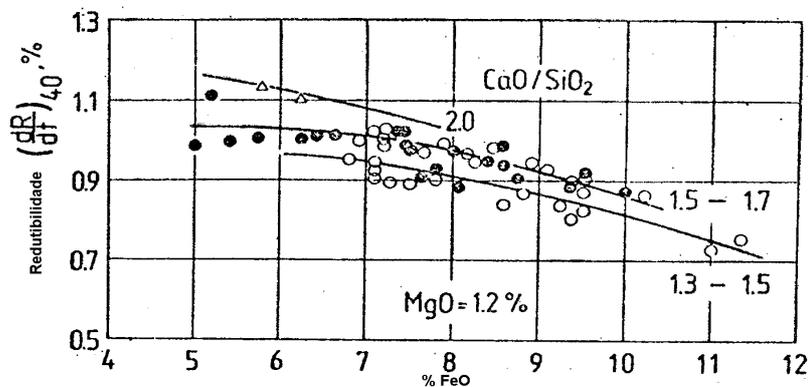


Figura 3.9 – Relação entre o índice de redutibilidade e o teor de FeO (LOO, 1998).

A redutibilidade da SFCA (ferrita de cálcio contendo sílica e alumina) pode ser relacionada com sua morfologia, sua porosidade, e se está envolta por uma fase vítrea. SFCA formada a baixas temperaturas de sinterização tem maior redutibilidade do que SFCA cristalina formada a altas temperaturas. Hematita primária (reliquia de minério) tende a possuir maior redutibilidade que hematita secundária devido a sua porosidade intrínseca (DAWSAN, 1993 b).

De acordo com Malysheva *et al.* (2007) a redutibilidade do sinter é maior na faixa de basicidade compreendida entre 1,5 e 2,3, conforme mostrado pela Figura 3.10.

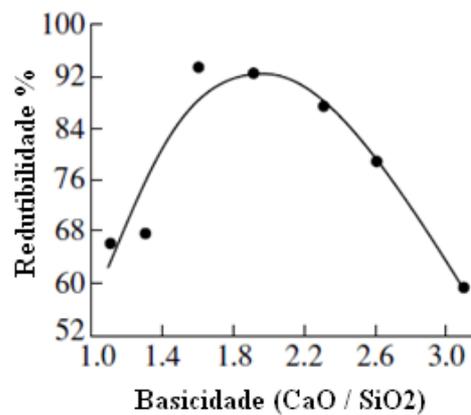


Figura 3.10 – Redutibilidade do sinter versus a basicidade(MALYSHEVA *et al.*,2007).

### 3.5.4 - Propriedades a Altas Temperaturas

O entendimento das propriedades a altas temperaturas aumentou enormemente através dos estudos desenvolvidos por alemães e japoneses onde altos-fornos foram resfriados e dissecados. Estes estudos chamaram a atenção da importância de uma região do alto-forno delimitada na sua parte superior pelo aparecimento do amolecimento da carga, e na parte inferior pelo início da fusão. Esta região, conhecida como zona coesiva, que pode ser visualizada nas Figuras 3.11 e 3.12, tem um significativo efeito na operação do alto-forno, particularmente na produtividade.

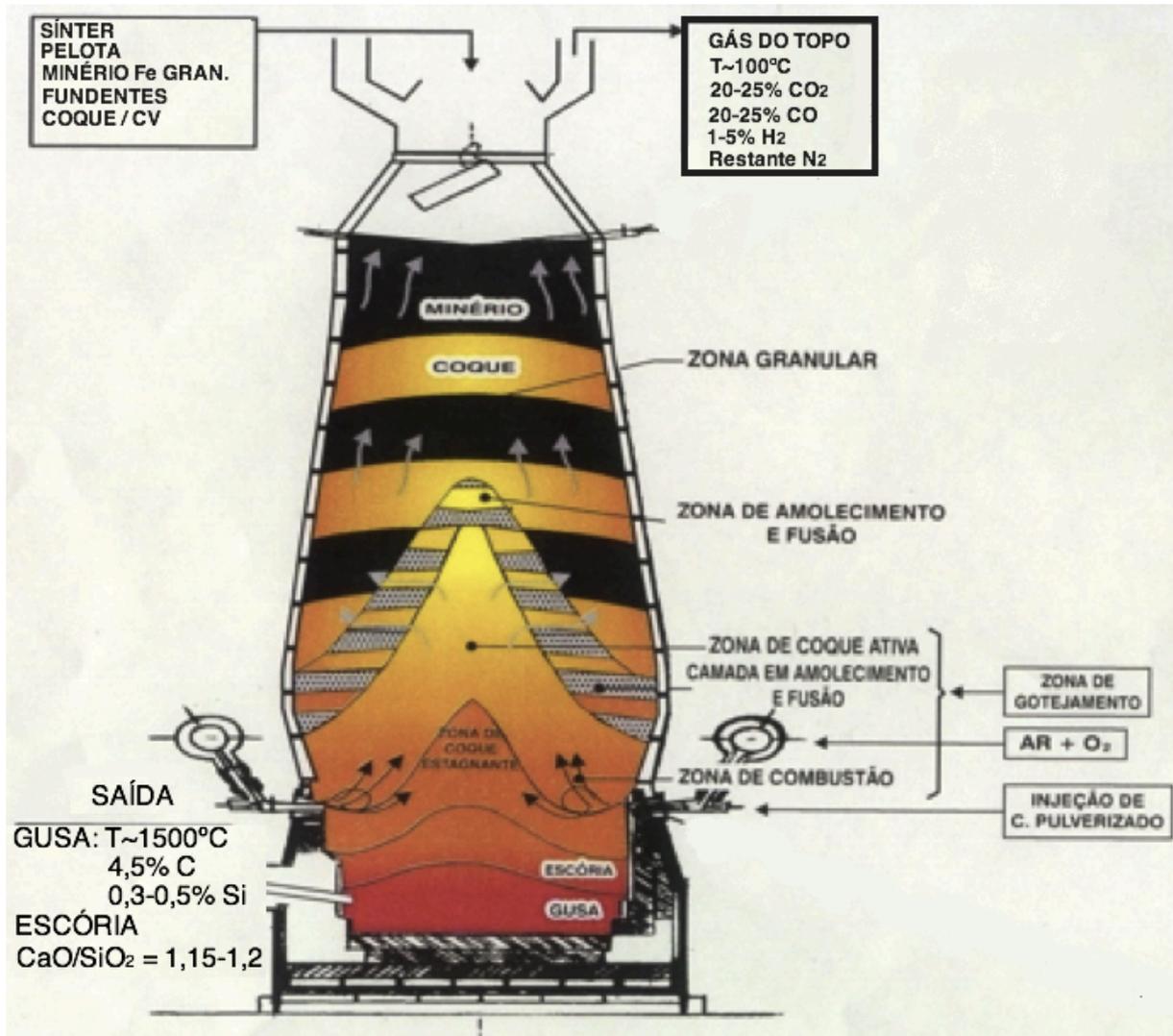


Figura 3.11 – O processo do alto-forno. Fonte: ArcelorMittal.

Uma estreita zona coesiva, isto é, uma pequena faixa de temperatura entre o amolecimento e a fusão é desejável (DAWSAN, 1993 b). Observa-se na Figura 3.12 que a passagem dos gases fica restrita à janelas de coque ( ou de carvão vegetal), pois a carga metálica encontra-se amolecida e/ou fundida, impedindo assim a passagens dos gases. Uma maior faixa de temperatura entre o amolecimento e fusão faria com que parte do material fundido invadisse as janelas de coque, prejudicando assim o fluxo dos gases e, quanto menor o fluxo dos gases menor é a produtividade do alto-forno.

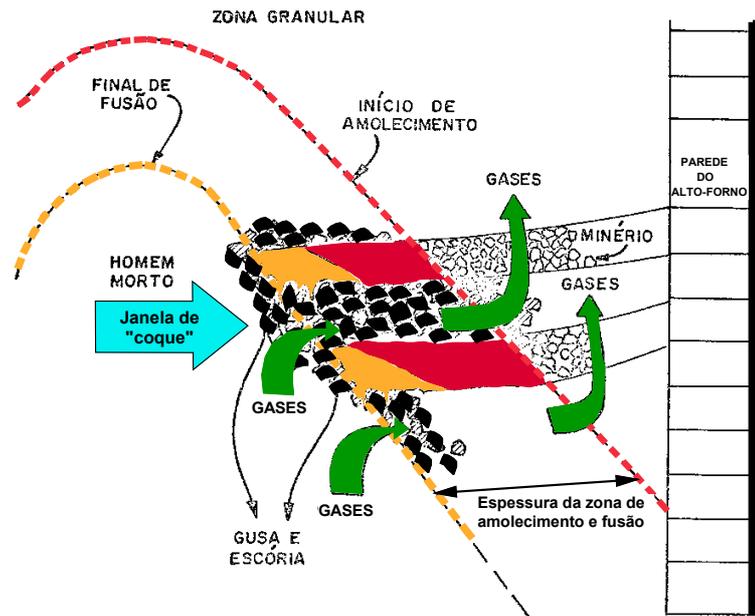


Figura 3.12 – Detalhe da zona de amolecimento e fusão (CAMPOS *apud* MOURÃO, 2007).

Muitos produtores de ferro-gusa e aço em todo o mundo desenvolveram métodos para estudar as propriedades de amolecimento e fusão. Embora os princípios destes testes sejam os mesmos, existem diferenças importantes entre eles, notavelmente na composição do gás, taxa de aquecimento, velocidade superficial do gás, etc. Atualmente não há um padrão internacional para este teste (DAWSAN, 1993b).

Muitos pesquisadores investigaram o efeito da composição química do sinter na propriedade de amolecimento e fusão. Hotta e Yamaoka (*apud* DAWSAN, 1993b) concluíram que a formação da escória fundida é que tem o maior efeito sobre a propriedade de amolecimento e fusão. A quantidade de escória depende da quantidade de ganga no sinter e na quantidade residual de FeO presente na temperatura de formação da escória. Desta forma, aumentando a redutibilidade aumenta-se a propriedade de amolecimento e fusão, pois haverá menor quantidade de FeO remanescente. O mesmo fenômeno foi observado por Lu et al (*apud* DAWSAN, 1993 b). O aumento da propriedade de amolecimento e fusão normalmente é feito pela adição de MgO, pois aumenta o ponto de fusão da escória com alto teor de FeO (DAWSAN, 1993b).

Kokuru *et al.* (1984) afirmaram que o aumento da basicidade melhora as propriedades de amolecimento e fusão, devido ao efeito do grau de redução obtido no início da zona coesiva, o que foi confirmado em estudos mais recentes conduzidos por Malysheva *et al.* (2007), conforme Figura 3.13.

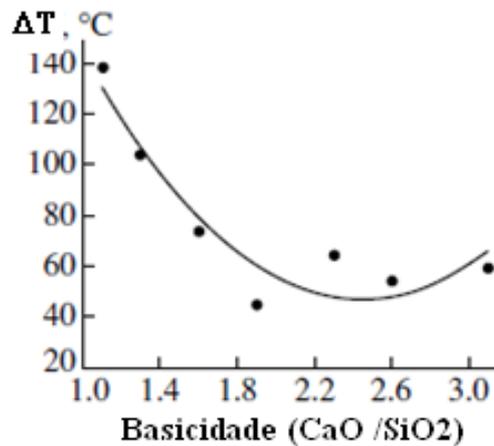


Figura 3.13 – Influência da basicidade na faixa de temperatura de amolecimento do sinter (MALYSHEVA, 2007).

### 3.6 - Combustível para Sinterização

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

Conforme ilustrado pela Figura 3.14, combustíveis com maior reatividade geram velocidades de frente de chama maiores, o que acarreta em maior produtividade na sinterização. Uma correlação linear foi encontrada por Lovel *et al.* (2009) entre a velocidade de frente de queima e logaritmo natural da reatividade do combustível, a qual é medida pela taxa de perda de massa do material (g/g) pelo tempo (s).

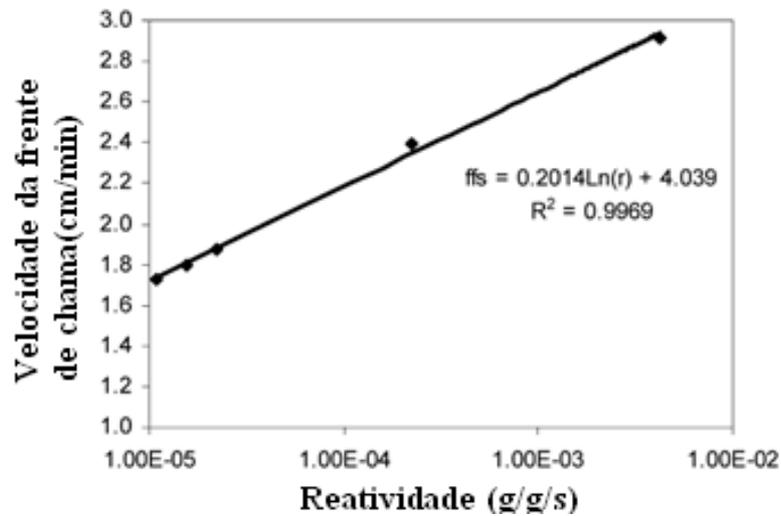


Figura 3.14 – Velocidade da frente de combustão (ffs) versus logaritmo natural da reatividade (r) do combustível (LOVEL *et al.*, 2009).

No que tange a qualidade do sinter, a resistência a frio do sinter também é afetada pela reatividade do combustível. A resistência do sinter cai a medida que a reatividade do combustível aumenta (LOVEL *et al.*, 2009).

### 3.7 - Processo de Pelotização

A pelotização é outro processo de aglomeração consagrado na siderurgia. De acordo com Umadevi *et al.* (2011) a basicidade da pelota na faixa de 0,33 a 0,78 proporciona boas propriedades físicas e metalúrgicas, podendo ser, portanto, uma alternativa para carga metálica dos altos-fornos a carvão vegetal. No entanto, trata-se de uma alternativa de maior custo operacional.

Conforme representado na Figura 3.15, a pelotização começa com a secagem da matéria prima e moagem desta para se obter a granulometria apropriada a este processo. A adição de água é feita a matéria-prima seca a fim de se obter uma polpa com a concentração correta. A polpa é transferida para o disco pelotizador onde as pelotas cruas são formadas.

Estas são levadas para o forno de endurecimento, onde após serem curadas são resfriadas e disponibilizadas para as etapas futuras (MOURÃO, 2007).

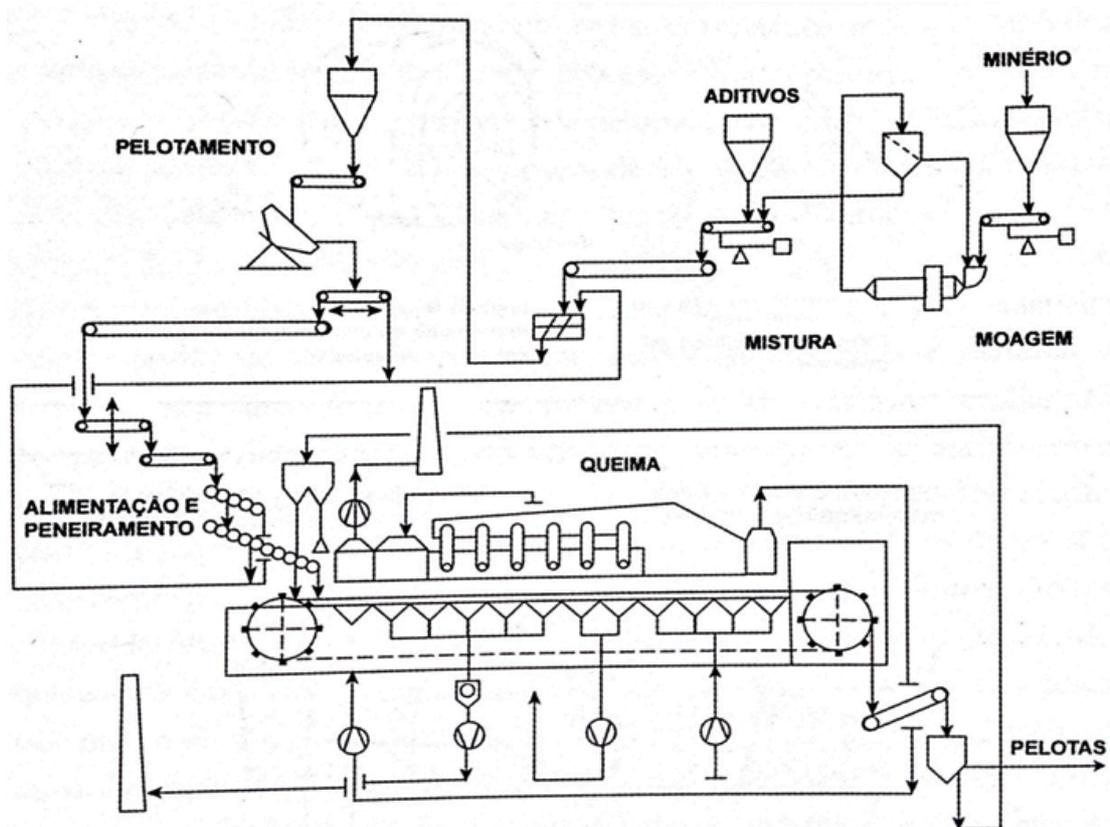


Figura 3.15- Diagrama do sistema de pelotização (MOURÃO, 2007).

A pelotização tem grande uso em locais com minério de ferro com baixo teor de ferro, os quais são extraídos, moídos até atingirem tamanho inferior a 0,1 mm e concentrados, como o que ocorre particularmente nos Estados Unidos. Em outras regiões do globo, minérios de ferro com alto teor de ferro e o processo de sinterização permitem o uso de uma rota de produção de menor custo. (DAWSAN, 1993a).

### 3.8 – Planejamento de Experimento

É um procedimento no qual alterações propositalmente são feitas nos fatores influentes de um processo, de modo que se possa avaliar as possíveis alterações sofridas pela variável resposta, com o objetivo de se determinar as causas que mais influenciam o efeito de interesse

em um processo. As alterações nos fatores influentes são realizadas de forma controlada e planejada a fim de se determinar a influência de cada fator ou a interação entre dois ou mais fatores. Atribui-se, normalmente, a cada fator dois níveis, um alto (+1) e um baixo (-1), sendo realizado uma combinação entre todos fatores e níveis (MASON, 2003). Dessa forma, para um experimento fatorial completo, o total de experimentos atinge  $2^k$ , onde k significa o número de fatores estudados, conforme exemplificado na Tabela 6.

Tabela 6 – Exemplo de um planejamento de experimento fatorial completo  $2^k$ , com  $k=2$  (WERKEMA e AGUIAR, 1996).

<i>Experimento</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Fator A	+	+	-	-
Fator B	+	-	+	-

Considerando o processo de sinterização, pode-se entender como variável resposta uma característica que se deseja avaliar, como por exemplo, a redutibilidade, o rendimento na sinterização ou o índice de degradação sob redução (RDI). Já por fator influente pode-se considerar a quantidade de pó de minério ou de pó de balão, ou outro fator que pode ser controlado e que venha a influenciar uma característica de interesse para a sinterização.

O efeito de um fator pode ser medido agrupando-se as variáveis respostas em dois grupos. O primeiro composto pelos experimentos realizados com o fator em questão assumindo o nível alto e, o segundo pelos experimentos realizados com o fator assumindo o nível baixo. O cálculo do efeito é realizado pela diferença das médias das variáveis respostas de cada grupo (WERKEMA e AGUIAR, 1996).

O cálculo do efeito de uma interação de fatores é realizado de modo similar, mas por envolver dois ou mais fatores, considera-se nível alto da interação quando o produto dos sinais de todos os fatores envolvidos seja positivo. O mesmo raciocínio é usado para o agrupamento dos experimentos em nível baixo.

## **4 METODOLOGIA**

### **4.1 Materiais**

Os materiais para os testes de sinterização foram fornecidos pela ArcelorMittal Aços Longos, Usina de Juiz de Fora. Para a mistura a sinterizar foram fornecidos finos de minério de ferro, finos de carvão vegetal, cal virgem, pó do balão e carepa de laminação.

Os finos de minério de ferro foram obtidos através do peneiramento do minério granulado, de procedência das minas de Serra Azul e Vargem Grande, em malha de 6,3 mm e, também, pela coleta do pó do sistema de despoeiramento das correias e peneiras de minério. De forma similar, os finos de carvão vegetal foram obtidos pelo peneiramento em malha de 9,5 mm e pela coleta de pó realizada em sistemas de despoeiramentos do circuito de carvão vegetal. A cal virgem é a mesma utilizada pelo processo de refino primário (Forno Elétrico a Arco). Já as demais matérias-primas para os testes de sinterização foram obtidas pela coleta de resíduos em diferentes partes do processo de redução, refino, lingotamento e laminação.

### **4.2 Pesagem dos Materiais a Sinterizar e do Sínter Produzido**

A pesagem dos materiais e do sínter produzido foi realizado em uma balança de piso com indicador digital, com capacidade para 500 kg e divisão de 50 gramas, fabricada por Alfa Instrumentos.

### **4.3 Caracterização dos Materiais Utilizados na Sinterização**

Os métodos de análise das matérias primas e do sínter produzido estão resumidos na Tabela 7. A descrição destes é realizada nas seções subsequentes.

Tabela 7 – Métodos de análises das matérias-primas e do sinter produzido.

<b>Método</b>	<b>Material</b>	<b>Minério de ferro</b>	<b>Carvão Vegetal</b>	<b>Cal Virgem</b>	<b>Carepa</b>	<b>Pó e lama</b>	<b>Sinter</b>
<b>Classificação em peneiras</b>		X	X	X	X	X	X
<b>Análise química</b>	Via úmida		X	X			X
	Espec. RX	X			X	X	X
<b>Análise Termofísica</b>			X				
<b>RDI</b>							X
<b>Redutibilidade</b>							X
<b>Queda (Ensaio Shatter)</b>							X

### 4.3.1 Análise Química e Termofísica

Para os finos de minério de ferro, pó do sistema de despoeiramento do circuito do minério de ferro e resíduos siderúrgicos foi realizada análise química, via espectrometria de raios x, nas instalações da ArcelorMittal Juiz de Fora. O modelo usado de espectrômetros de raios x foi o PANalytical MagiX.

Para os finos de carvão vegetal e pó do sistema de despoeiramento do circuito de carvão vegetal, foi realizada análise imediata através de um analisador termogravimétrico LEKO Modelo TGA701S4C, determinando assim o teor de umidade, carbono e cinzas. As cinzas foram caracterizadas através de análise química via úmida, em laboratório externo a ArcelorMittal Juiz de Fora.

### 4.3.2 Distribuição Granulométrica dos Materiais a Sinterizar

A determinação da distribuição granulométrica dos materiais a sinterizar foi realizada através de peneiramento em um conjunto de peneiras Tamis com diâmetro de 8 polegadas e altura de 2 polegadas, com abertura das malhas na faixa de 0,1 a 9,5 mm, conforme norma ISO 3310/1.

## 4.4 Mistura e Sinterização da Matéria-prima

### 4.4.1 Mistura

Os materiais foram misturados em uma betoneira Menegotti Profissional com capacidade do tambor de 400 litros e 15 rpm. O eixo de rotação do tambor foi mantido em um ângulo de 25° em relação a horizontal e o tempo de mistura foi maior ou igual a 4 minutos.

### 4.4.2 Sinterização

Os testes de sinterização foram inicialmente realizados nas instalações de uma empresa parceira da ArcelorMittal, especializada na produção de sinter a partir de resíduos siderúrgicos. No entanto, a fim de garantir o acompanhamento estreito dos testes, um equipamento para sinterização em bancada foi desenvolvida para operar nas instalações da ArcelorMittal Juiz de Fora (Figura 4.1).



Figura 4.1 – Foto do equipamento de sinterização em bancada

A sinterização de bancada da ArcelorMittal Juiz de Fora é composta por uma panela de sinterização, dutos de exaustão, câmara para coleta dos particulados arrastados pela

exaustão, ventilador centrífugo (atuando como um exaustor) e chaminé (Figura 4.2). A panela de sinterização possui diâmetro interno de 300 mm com uma altura de 400 mm. O ventilador centrífugo é composto por um motor trifásico 440 V / 7,4 CV / 2 Polos, com vazão ajustável por um damper, podendo variar de 10 a 45 m<sup>3</sup>/min, com respectivamente, 1050 e 400 mmCa de depressão. Além dos equipamentos citados, foi montado um painel dotado de inversor de frequência para acionamento do motor do ventilador centrífugo. Para o monitoramento da temperatura da frente de sinterização foram montados um display e dois termopares do tipo R com faixa de temperatura de -50 a 1768° C.

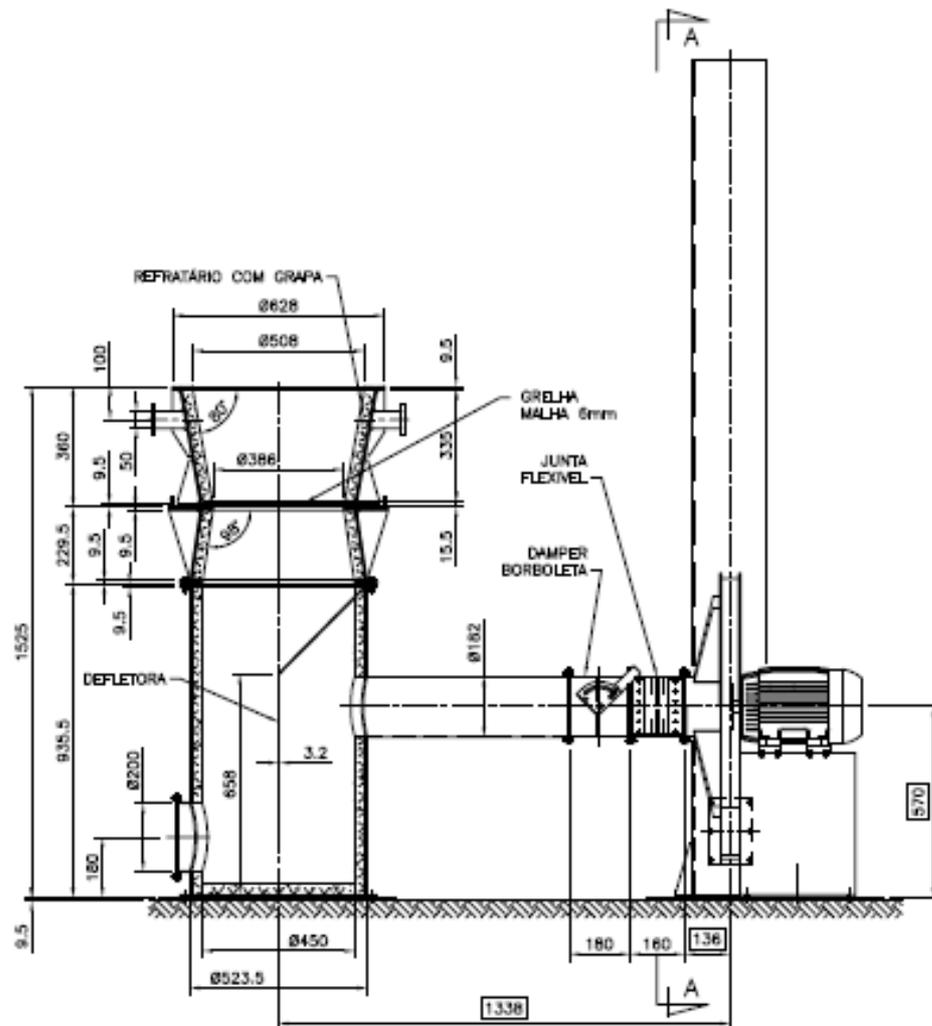


Figura 4.2 – Desenho de fabricação (vista frontal) da sinterização em bancada

## **4.5 Plano para Produção do Sínter**

Os testes para a produção experimental de sinter foram feitos em duas etapas. Na primeira etapa procurou-se identificar as características do sinter em função de sua basicidade, na faixa de 1,0 à 1,8. Ao final desta etapa, após análises das características do sinter escolheu-se o valor de basicidade que melhor se adequasse as necessidades para o alto-forno a carvão vegetal.

Na segunda etapa, com o valor de basicidade fixo, verificou-se a influência do uso de resíduos siderúrgicos na qualidade do sinter, através de um planejamento de experimento.

### **4.5.1 Primeira Etapa: Produção e Caracterização do Sinter em Diferentes Basicidades**

O objetivo desta etapa foi determinar o rendimento, índice de redutibilidade, resistência a frio e índice de degradação sob redução (RDI) do sinter para cada basicidade na faixa de 1,0 a 1,8. Nesta fase, utilizou-se somente finos de minério, finos de carvão vegetal (moinha) e cal. A partir das análises químicas, foi realizado um balanço de massa, utilizando-se uma planilha eletrônico adotada pela sinterização de outra usina da ArcelorMittal, a fim de determinar a receita para a obtenção do sinter em cada basicidade ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) desejada.

A quantidade de carvão foi determinada por testes e pela análise do trabalho desenvolvido por Falco *et al.* (2000).

### **4.5.2 Segunda Etapa: Influência do Pó do Balão, Carepa e Pó de Minério**

O objetivo desta etapa foi determinar a influência dos resíduos do pó do balão, pó do minério de ferro e carepa da laminação nas características físicas e metalúrgicas do sinter produzido. A carepa possui o inconveniente de aumentar o percentual de FeO do sinter

(CUNHA *et al.*, 2006), o pó do balão e o pó de minério possuem tamanho da partícula inferior a 0,1 mm, o que dificulta o processo de sinterização (HONORATO, 2005). Tendo em vista a produção de sinter com a basicidade adequada à altos-fornos a carvão vegetal, a basicidade do sinter foi fixada em um valor tal que fosse o menor possível, mas que tivesse boa resistência mecânica, índices de redutibilidade e de degradação sob redução igual ou superiores aos minérios de ferro ora em uso na ArcelorMittal Juiz de Fora.

Nesta etapa também foi usado como combustível o pó do despoeiramento do carvão vegetal, somando-se a moinha de carvão vegetal.

#### 4.5.3 Planejamento de Experimento

A influência de três resíduos foi analisada em um experimento fatorial  $2^3$ , conforme mostrada na Tabela 8, onde o nível “+” indica a presença do resíduo e o nível “-” a sua ausência. Enquanto que a numeração de 7.1 a 8.4 representam o número do experimento realizado.

Tabela 8 – Planejamento de experimento fatorial completo  $2^3$ .

<i>Experimento</i>	7.1	7.2	7.3	7.4	8.1	8.2	8.3	8.4
<i>Resíduo</i>								
Pó de minério	+	+	+	+	-	-	-	-
Carepa	+	+	-	-	+	+	-	-
Pó do balão	+	-	+	-	+	-	+	-

A quantificação da influência de cada fator, ou seja, o resíduo usado, foi realizada usando o gráfico de Pareto dos Efeitos, enquanto que o comportamento destes foi descrito usando-se o gráfico dos Efeitos Principais. Enquanto o primeiro tipo de gráfico serviu para identificar os fatores mais influentes, o segundo foi usado para descrever o que acontece com determinada característica do sinter quando aumenta-se a quantidade de um dado resíduo.

Para estimar, por interpolação, o valor de uma variável resposta em função dos fatores e interações entre eles, foi usada a Equação de Regressão, a qual foi montada utilizando-se os dados obtidos pelo planejamento de experimentos.

## **4.6 Caracterização do Sínter Produzido**

Para cada tipo de sinter produzido foi realizada avaliação de qualidade para verificar o que melhor atende a produção de ferro gusa em um alto-forno a carvão vegetal.

### **4.6.1 Ensaio de Queda – Teste Shatter**

Realizado para determinar a resistência mecânica a frio de cada sinter produzido. Esta é uma característica muito importante uma vez que o sinter se degrada durante a movimentação do mesmo até ser definitivamente carregado no topo do alto-forno.

O ensaio foi realizado conforme norma JIS M8711 (*Shatter index*), devido a sua simplicidade, facilidade e custo baixo (TEO, 1990).

Este ensaio exige que se faça a análise da distribuição granulométrica antes e depois da degradação forçada do sinter. Dessa forma, para as análise da granulometria foram utilizadas um agitador de peneiras Betel com capacidade para até 6 peneiras de 50 x 50 x 10 cm. A abertura das malhas seguiu a norma ISO 3310/1, sendo usada as seguintes abertura: 6,3 – 9,5 – 19 – 25 – 50 mm.

### **4.6.2 Análise Química do Sínter**

A análise química do sinter não pode ser feita utilizando-se o espectrômetro de raios x, devido a inexistência de uma curva de calibração adequada as características das amostras de sinter, que apresentaram valores de FeO elevados. Dessa forma, a análise química foi

realizada pelo processo de via úmida em um laboratório que atende a Usina da ArcelorMittal, localizada em João Monlevade, MG. Foram analisados os percentuais de Fe, FeO, SiO<sub>2</sub>, CaO, P, MgO, Mn, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e PPC.

#### **4.6.3 Índice de Redutibilidade**

O índice de redutibilidade mede a facilidade com o que o sinter perde oxigênio para um agente redutor. Para a determinação deste índice foi utilizada a norma ISO 7215. Este ensaio foi realizado no laboratório que atende a Usina da ArcelorMittal, localizada em João Monlevade, MG.

#### **4.6.4 Índice de Degradação sob Redução (RDI)**

Este índice representa a degradação do sinter durante a sua redução a baixa temperatura. Para a sua determinação foi utilizada a norma ISO 4696-2. Este ensaio foi realizado no laboratório que atende a Usina da ArcelorMittal, localizada em João Monlevade, MG.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Primeira Etapa: Produção e Caracterização do Sínter em Diferentes Basicidades

A primeira etapa dos testes foi iniciada nas instalações de uma empresa parceira da ArcelorMittal, especializada na produção de sinter a partir de resíduos siderúrgicos. No entanto, os primeiros resultados obtidos (primeira tentativa) não apresentaram coerência com o descrito na literatura. Dessa forma, decidiu-se por reiniciar estes testes (segunda tentativa), mas desta vez nas instalações da ArcelorMittal Juiz de Fora. A seguir será discutido as duas tentativas realizadas para caracterizar com êxito o sinter em função de sua basicidade.

#### 5.1.1 Primeira Tentativa de Produzir e Caracterizar o Sinter em Função da Basicidade

Embora na primeira tentativa não se tenha atingido os objetivos listados na seção 4.5.1, abaixo são discutidos os resultados obtidos, pois estes mostram a influência do teor de FeO na resistência a frio do sinter.

Para a primeira tentativa de caracterizar o sinter em função de sua basicidade, foram enviados, a uma empresa parceira da ArcelorMittal Juiz de Fora, finos de minério de ferro, cal e moinha de carvão vegetal. As composições químicas destes materiais são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Composição química dos materiais disponíveis para primeira etapa/primeira tentativa.

Material	% Fe	% SiO <sub>2</sub>	% CaO	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% MgO	% P	% Mn	% C	% umid.
Finos de carvão vegetal (moinha)	0,14	0,75	1,18	0,15	-	0,09	-	66	9
Finos de minério de ferro	62	6,0	0,06	0,96	0	0,024	0,07	-	4
Cal		5,0	91,15	0,255	0,38	0,021			

Com estes dados foi realizado um balanço de massa para se obter as basicidades com as respectivas quantidades de cada material, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Materiais usados na primeira etapa/primeira tentativa de sinterização.

Basicidade calculada	Finos de Minério	Calcário	Moinha de Carvão	Umidade da mistura
1,0	82,75%	9,17%	8,07%	14%
1,1	82,00%	10,00%	8,00%	14%
1,2	81,26%	10,81%	7,93%	14%
1,3	80,54%	11,61%	7,86%	14%
1,4	79,82%	12,39%	7,79%	14%
1,5	79,13%	13,16%	7,72%	14%

Para cada valor de basicidade foram feitas três bateladas de sínter. As quais foram enviadas a ArcelorMittal Juiz de Fora, a qual providenciou as análises químicas e ensaios de queda pelo método Shatter, para determinar a resistência a frio. Os resultados das análises químicas estão apresentados na Tabela 11, enquanto que a resistência a frio será discutida posteriormente nesta seção.

Tabela 11 – Análise química dos sínteres produzidos na primeira etapa/primeira tentativa.

Amostra	% Fe	% SiO <sub>2</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% P	% Mn	% CaO	% MgO	% FeO
01	58,88	8,61	1,30	0,084	0,22	8,84	0,78	43,09
02	59,75	8,83	1,36	0,074	0,15	8,08	0,53	51,06
03	56,41	8,17	1,12	0,071	0,19	11,77	0,83	36,24
04	55,42	9,23	1,54	0,076	0,23	10,60	0,78	39,45
05	57,50	9,51	1,19	0,077	0,19	7,60	0,71	26,40
06	56,44	8,37	1,22	0,075	0,25	11,29	0,95	39,25
07	59,19	8,26	1,32	0,047	0,36	8,07	0,97	49,14
08	57,79	7,90	1,21	0,047	0,25	9,02	0,87	36,44
09	58,30	8,84	1,25	0,066	0,40	7,93	0,99	42,09
10	55,26	8,22	1,06	0,081	0,21	14,29	0,93	39,40
11	58,35	8,24	1,11	0,066	0,30	9,24	0,99	29,79
12	59,84	7,56	1,16	0,060	0,36	9,22	0,99	48,02
13	57,11	8,77	1,12	0,077	0,20	9,56	0,79	28,94
14	56,97	7,73	1,13	0,068	0,24	11,35	0,93	31,63
15	57,19	8,46	1,27	0,066	0,19	9,52	0,81	31,26
16	56,16	10,85	1,00	0,070	0,20	9,45	0,67	27,02
17	58,44	8,53	1,20	0,070	0,20	10,36	0,77	42,12
18	55,57	8,20	1,20	0,084	0,25	13,33	0,97	30,88

A Figura 5.1 destaca os percentuais de FeO encontrados nas amostras de sinteres produzida. Nesta Figura, verifica-se que os valores de FeO estão muito acima do que normalmente é praticado nas sinterizações, onde os valores normalmente estão próximos de 10% (MALYSHEVA, 2007). Os elevados valores de FeO, bem como a sua variabilidade interferem na qualidade do sínter produzido.

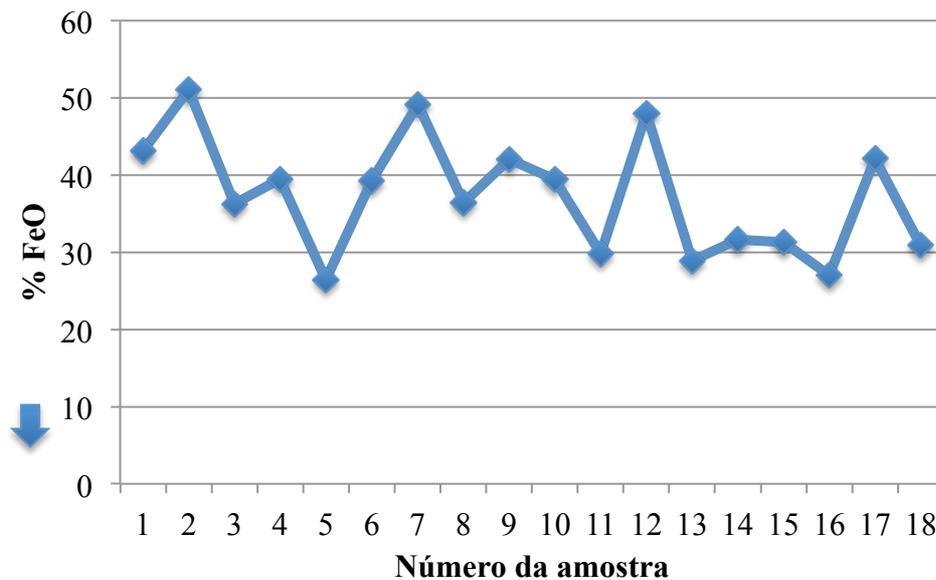


Figura 5.1 – %FeO encontrado nas amostras na primeira etapa/primeira tentativa de caracterizar o sínter em função de sua basicidade.

Existe uma relação estreita entre o teor de FeO e a temperatura da frente de combustão durante a sinterização e desta com a quantidade de combustível usada (DAWSAN, 1993 b), portanto a causa provável para os elevados valores do teor de FeO foi o uso excessivo de combustível, levando em alguns casos a produção de sinteres com estrutura homogênea, que são indesejáveis para os altos-fornos por possuírem menor índice de redutibilidade (VIEIRA *et al.*, 2003).

A quantificação da resistência mecânica a frio foi feita usando um teste de queda (ensaio Shatter). O resultado deste teste está representado pelo Gráfico da Figura 5.2, na qual se tenta, sem sucesso, encontrar uma correlação entre a resistência a frio do sínter com a sua

basicidade. Esta correlação era esperada, conforme apresentado nos trabalhos realizados por Fedorenko *et al.* (1970) e Malysheva *et al.* (2007).

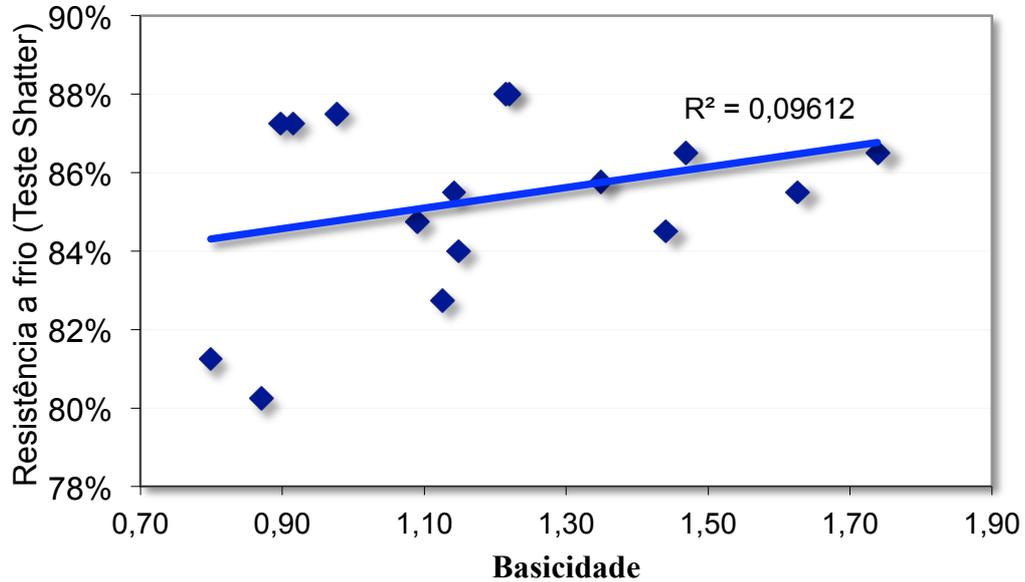


Figura 5.2 – Correlação entre a basicidade e a resistência a frio do sinter na primeira etapa/primeira tentativa, afetada pela variabilidade do teor de FeO das amostras.

A baixa correlação entre a resistência a frio do sinter e a sua basicidade é justificada pela variabilidade dos teores de FeO, o que introduziu um ruído elevado no experimento. No entanto, pela Figura 5.3 pode-se observar que há uma expressiva correlação entre o teor de FeO e a resistência a frio do sinter.

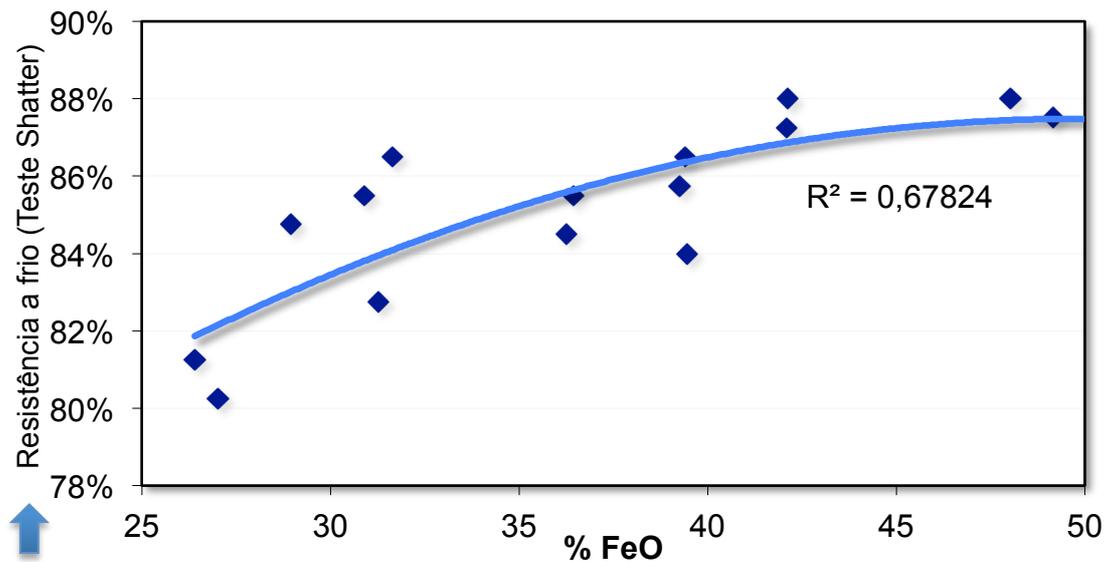


Figura 5.3 – Correlação entre o % FeO e a resistência a frio do sinter na primeira etapa/primeira tentativa.

Devido a incertezas e incongruências dos resultados dos primeiros testes de sinterização, decidiu-se pela interrupção destes. Fazendo-se assim uma nova tentativa nas instalações da ArcelorMittal Juiz de Fora, a fim de caracterizar corretamente o sinter em função de sua basicidade.

### 5.1.2 Segunda Tentativa de Produzir e Caracterizar o Sinter em Função da Basicidade

A segunda tentativa de caracterização foi realizada nas instalações da ArcelorMittal Juiz de Fora. O trabalho inicial foi a caracterização dos materiais a serem sinterizados. Novamente, utilizou-se finos de minério, moinha de carvão vegetal e cal virgem. As características químicas e granulométricas destes materiais são apresentadas nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Composição química dos materiais disponíveis para a primeira etapa/segunda tentativa.

Material	% Fe	% SiO <sub>2</sub>	% CaO	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% MgO	% P	% Mn	% C	% umid.
Finos de carvão vegetal (moinha)	0,14	0,75	1,18	0,15	-	0,09	-	66	9
Finos de minério de ferro Vargem Grande (peneiramento)	67,5	2,0	0,06	0,96	0	0,024	0,07	-	4
Finos de minério de ferro Serra Azul (peneiramento)	60,3	12,1	0,06	2,35	0	0,035	0,11	-	4
Cal	-	5,0	92,2	0,255	0,38	0,021	-	-	-

Tabela 13 – Distribuição granulométrica dos materiais disponíveis para a primeira etapa/segunda tentativa.

Material	6,3 mm	1,0 mm	0,3 mm	<0,3 mm
Finos de carvão vegetal (moinha) (%)	18,54	69,25	12,21	-
Finos de minério de ferro Vargem Grande (peneiramento) (%)	2,63	59,77	10,01	24,14
Finos de minério de ferro Serra Azul (peneiramento) (%)	4,72	47,85	9,17	31,52
Cal (%)	-	24,7	70,4	4,9

Após a caracterização dos materiais a serem sinterizados, foi iniciada a etapa de sinterização com o equipamento desenvolvido exclusivamente para este fim pela ArcelorMittal Juiz de Fora. Por se tratar de um equipamento novo, o primeiro passo foi estabelecer o procedimento de funcionamento visando a segurança operacional e o conhecimento do equipamento. Uma amostra do primeiro síter produzido é apresentada na Figura 5.4.



Figura 5.4 – Amostra do primeiro síter produzido em bancada

Estando a operação do equipamento padronizada, passou-se a determinação da quantidade de combustível a ser usada na sinterização. Como base tomou-se o trabalho desenvolvido por Falco et al (2000), estabelecendo três níveis para o combustível (base úmida): 4,6 – 5,5 – 7,6 kg/batelada. Através da avaliação dos resultados foi definida a quantidade de 5,5 kg/batelada como referência de quantidade de combustível a ser usada. No entanto, como o plano de trabalho previa a produção de síteres em diferentes basicidades ( $\text{CaO} / \text{SiO}_2$ ) e o consumo de combustível é inversamente proporcional à quantidade de óxido de cálcio presente (KURKIN *et al.*, 2007), estudou-se valores alternativos para a quantidade de combustível, conforme mostrado na Tabela 14. Assim para basicidades menores (1,0 e 1,1) testou-se também uma quantidade maior de combustível. Já para valores maiores de basicidade (1,4 a 1,8) testou-se também valores menores de combustível.

Tabela 14 – Quantidade de finos de carvão vegetal ser utilizado na primeira etapa/segunda tentativa.

Quantidade de carvão vegetal	Basicidade						
	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,8
5,0 kg / batelada					X	X	X
<b>5,5 kg / batelada</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
7,6 kg / batelada	X	X					

A composição do leito de sinterização, com a quantidade de cada material a ser sinterizado é mostrada na Tabela 15. Estas proporções foram obtidas por meio de um balanço de massa, por meio dos dados das análises químicas apresentadas na Tabela 12 e também as quantidades de combustíveis mostradas na Tabela 14.

Tabela 15 – Leito de sinterização para a primeira etapa/segunda tentativa.

Número do teste	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	4.1	4.2	5.2	5.3	6.1	6.2	6.3
Basicidade teórica	1,3	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0	1,1	1,4	1,8	1,6	1,6	1,8
Finos de minério de Ferro V. Grande (kg)	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
Finos de minério de Ferro S. Azul (kg)	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
Cal (kg)	5,4	5,8	4,9	4,4	4,0	4,0	4,4	5,8	7,7	6,7	6,7	7,7
Moinha CV (kg)	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	7,6	7,6	5,0	5,0	5,0	5,5	5,5
<b>Total Mistura úmida (kg)</b>	<b>62,9</b>	<b>63,3</b>	<b>62,4</b>	<b>62,4</b>	<b>61,5</b>	<b>63,6</b>	<b>64,0</b>	<b>62,8</b>	<b>64,7</b>	<b>63,7</b>	<b>64,2</b>	<b>65,2</b>

Para cada teste os materiais foram misturados em uma betoneira. Durante a mistura foi adicionada quantidade de água até se obter grânulos de forma a não se ter finos soltos ou excesso de umidade, a qual foi mantida em torno de 14%. A quantidade de água não foi fixa, sendo maior para as basicidades maiores, devido a reação de hidratação da cal virgem. Após a mistura estar pronta ela foi dividida em duas partes iguais, as quais foram sinterizadas separadamente e em sequência devido a capacidade da panela. Para cada parte sinterizada foi anotado o tempo gasto para a sinterização, a altura do leito e a temperatura máxima alcançada.

Após o resfriamento ao ar, cada tipo de sinter produzido foi pesado considerando-se apenas a fração superior a 6,3mm. Os dados obtidos são mostrados no Apêndice 1.

### 5.1.2.1 O Rendimento da Sinterização

O rendimento da sinterização foi afetado tanto pela basicidade, quanto pela quantidade de carvão usada. Em quatro testes, de um total de cinco, maior quantidade de carvão vegetal representou maior rendimento na sinterização. A Figura 5.5, representa o rendimento da sinterização *versus* a basicidade do sinter, considerando quantidades diferentes de carvão vegetal.

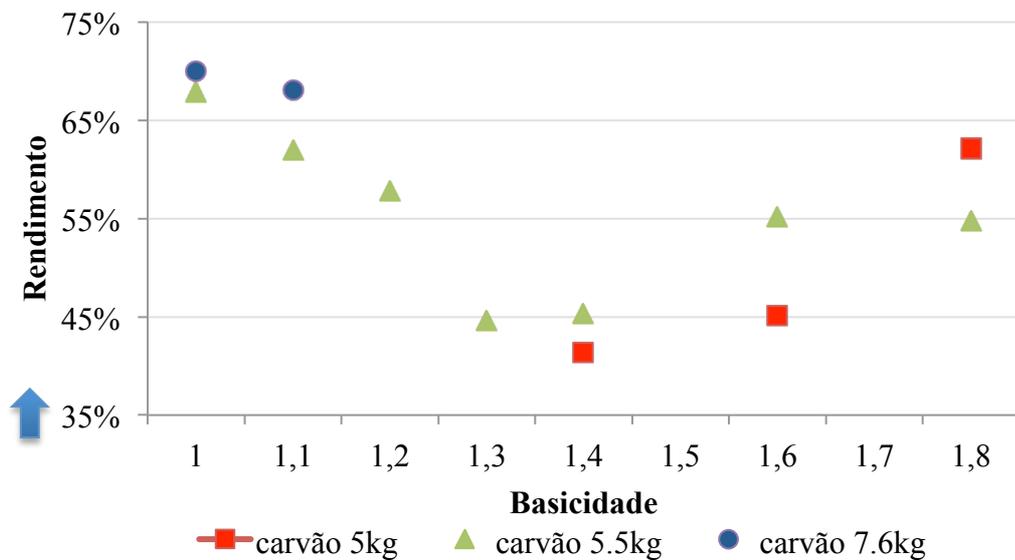


Figura 5.5 – Rendimento da sinterização considerando a quantidade de carvão utilizada.

Com relação a influência da basicidade no rendimento da sinterização, uma curva, com um ótimo índice de correlação, pode ser ajustada conforme demonstrado na Figura 5.6. O rendimento diminui quando a basicidade aumenta de 1,0 até 1,4. E volta a crescer na faixa de basicidade de 1,4 a 1,8.

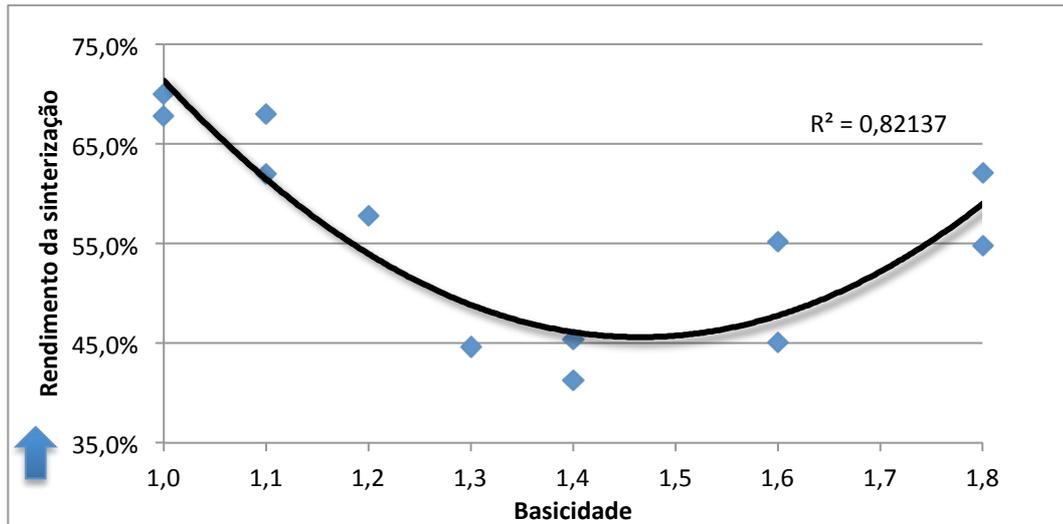


Figura 5.6 – Rendimento da sinterização, curva ajustada.

### 5.1.2.2 Análise Química das Amostras de Sínter

Um das preocupações da segunda tentativa de caracterizar o sínter em função de sua basicidade, foi manter o teor de FeO sob controle, a fim de evitar a influência deste no teste de resistência a frio, conforme determinado na primeira tentativa, e, também no índice de redutibilidade e RDI. Nesta fase, os teores de FeO das amostras de sínter ficaram abaixo de 20%, conforme Figura 5.7, o que permitiu a continuidade dos testes.

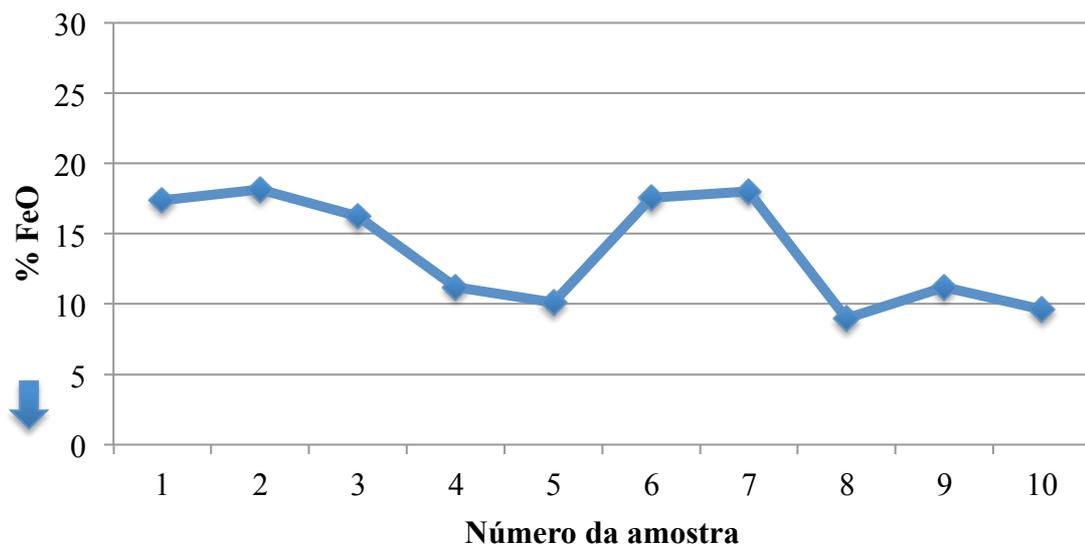


Figura 5.7 – %FeO encontrado nas amostras na primeira etapa/segunda tentativa de caracterizar o sínter em função de sua basicidade.

A variação do teor de FeO é atribuída a variação da quantidade de combustível usada em cada teste de sinterização. A Figura 5.8 exibe o percentual médio de FeO para cada quantidade de carvão vegetal usada. Conforme esperado o percentual de FeO é diretamente proporcional a quantidade de carvão.

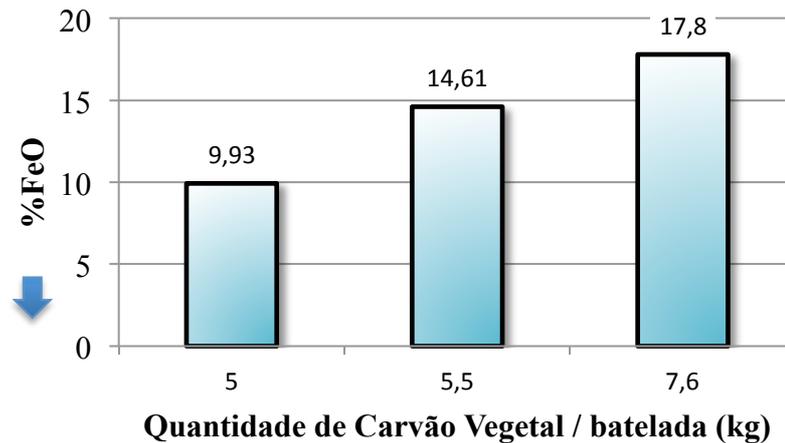


Figura 5.8 – %FeO médio encontrado para cada quantidade de carvão vegetal utilizada na segunda tentativa de caracterizar o sinter em função de sua basicidade.

Os percentuais de ferro total das amostras ficaram entre 55 e 59%. Sendo maiores para as basicidades menores, como mostrada na Figura 5.9. O baixo teor de ferro pode ser atribuído ao alto valor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) presente nos materiais que foram sinterizados. A redução do teor de ferro com o aumento da basicidade é explicado pela maior quantidade de cal, fonte de CaO, responsável pelo aumento da basicidade.

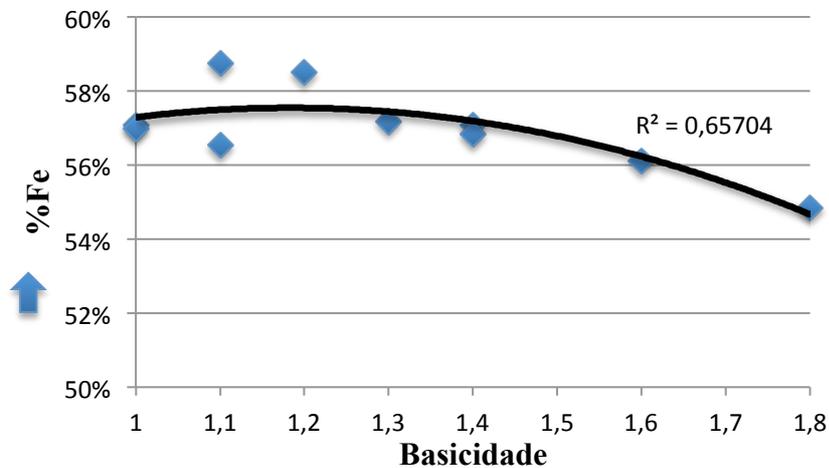


Figura 5.9 – %Fe em função da basicidade, primeira etapa/segunda tentativa.

Uma vez que o percentual de FeO ficou dentro do esperado pode-se passar aos testes de resistência a frio, índice de redutibilidade e RDI.

### 5.1.2.3 A Resistência Mecânica a Frio

A quantificação da resistência mecânica a frio do sinter foi realizada através do teste de queda (Ensaio Shatter), conforme descrito na seção 4 (Metodologia). Os dados obtidos, conforme mostrados na Figura 5.10, apresentaram boa correlação, em acordo com os trabalhos realizados por Fedorenko *et al.* (1970) e Malysheva *et al.* (2007). Partindo do ponto de basicidade igual a 1,0, a resistência mecânica teve comportamento decrescente, até atingir o ponto de mínimo, correspondente a basicidade igual a 1,4. A partir deste ponto, o valor de resistência mecânica volta a crescer. Malysheva *et al.* (2007) atribui este comportamento anômalo a insuficiente profundidade de reação nos componentes da mistura, devido a presença de silicato dicálcio  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ , e das múltiplas fases na composição mineralógica do sinter.

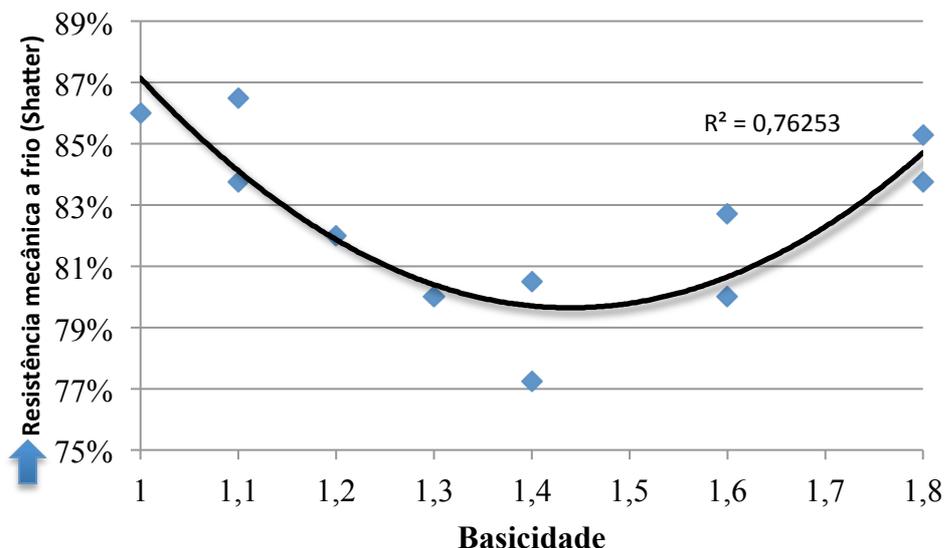


Figura 5.10 – Correlação entre a basicidade e a resistência a frio do sinter na primeira etapa/segunda tentativa (%FeO médio = 13,84%)

### 5.1.2.4 Índice de Redutibilidade

O índice de redutibilidade teve comportamento semelhante ao descrito por Malysheva (2007), o seu valor aumentou de acordo com o aumento da basicidade, na faixa de 1,0 a 1,8. No entanto, para a basicidade de 1,8, o seu valor pode ser considerado baixo pois atingiu aproximadamente 71%. Mas isto pode ser atribuído aos valores de FeO obtidos nos testes, pois, conforme descrito por Loo (1998) e mostrado na Figura 3.9, o aumento do teor de FeO reduz o índice de redutibilidade. De qualquer forma, os valores obtidos estão acima do índice de redutibilidade para a hematita natural, ou seja, 49,9% (MOURÃO, 2007).

Um bom índice de correlação foi obtido entre o índice de redutibilidade e a basicidade conforme mostrado na Figura 5.11.

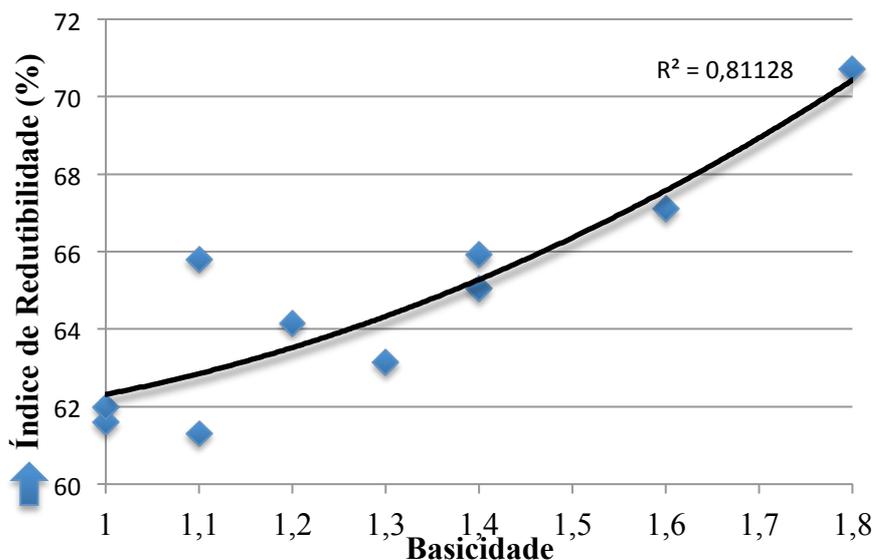


Figura 5.11 – Correlação entre a basicidade e o índice de redutibilidade do sinter na primeira etapa/segunda tentativa.

O aumento da basicidade favorece o aumento do índice de redutibilidade, pois a maior basicidade significa maior quantidade de CaO no sinter e, por conseguinte, maior formação de ferrita de cálcio, a qual possui índice de redutibilidade superior a outras fases minerais (DAWSAN, 1993 b), a exceção da hematita.

### 5.1.2.5 Índice de Degradação sob Redução (RDI)

O índice de degradação sob redução teve seus valores reduzidos de acordo com o aumento da basicidade, apresentando um bom índice de correlação conforme mostrado na Figura 5.12.

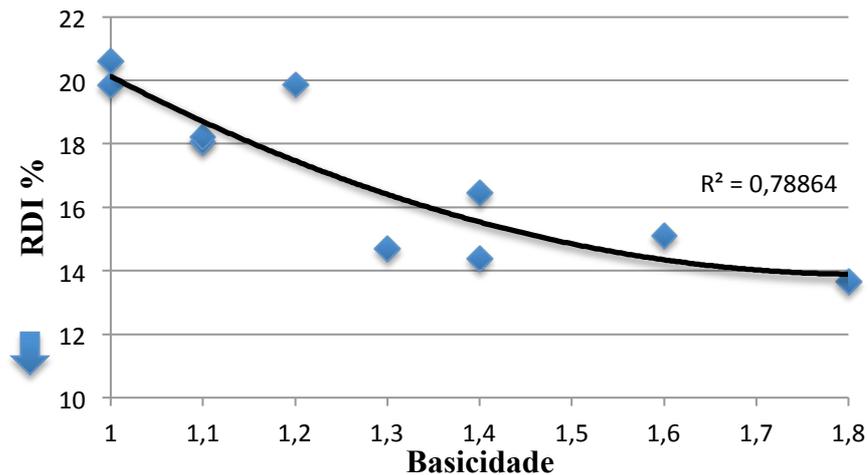


Figura 5.12 – Correlação entre a basicidade e o RDI na primeira etapa/segunda tentativa.

Os valores obtidos podem ser considerados bons, pois estão abaixo de 20%, valor referência para este índice. O aumento da basicidade favorece a redução do índice de degradação sob redução (RDI), pois a maior quantidade de CaO, responsável pelo aumento da basicidade, reduz a quantidades de fases vítreas. Dessa forma as fases minerais formadas possuem maior habilidade de resistir à propagação de trincas, conferindo ao sínter menor RDI.

### 5.1.3 Escolha do Valor de Basicidade do Sínter

Altos-fornos a carvão vegetal trabalham com o valor da basicidade da escória em torno de 0,75 e, para uma boa operação, a quantidade de escória, gerada durante a redução da carga metálica, deve ser a mínima possível. Sendo assim, é importante que o sínter tenha a menor basicidade possível, atendendo os limites mínimos aceitáveis para a resistência

mecânica a frio, índice de redutibilidade e índice de degradação sob redução. Partindo-se da premissa que deseja-se buscar uma alternativa ao minério de ferro granulado (*hematitinha*), a escolha da basicidade do sinter foi feita, não procurando o seu valor ótimo, mas sim procurando um valor tal que possua propriedades iguais ou superiores aos minérios de ferro atualmente em uso pela ArcelorMittal Juiz de Fora.

A escolha da basicidade do sinter levou em consideração o rendimento na sinterização, percentual de ferro em sua composição, a resistência mecânica a frio, o índice de redutibilidade e o índice de degradação sob redução (RDI). Uma referência de valor para os dois últimos itens é mostrada nos gráficos da Figura 5.13. Para os demais itens, optou-se pelos maiores obtidos.

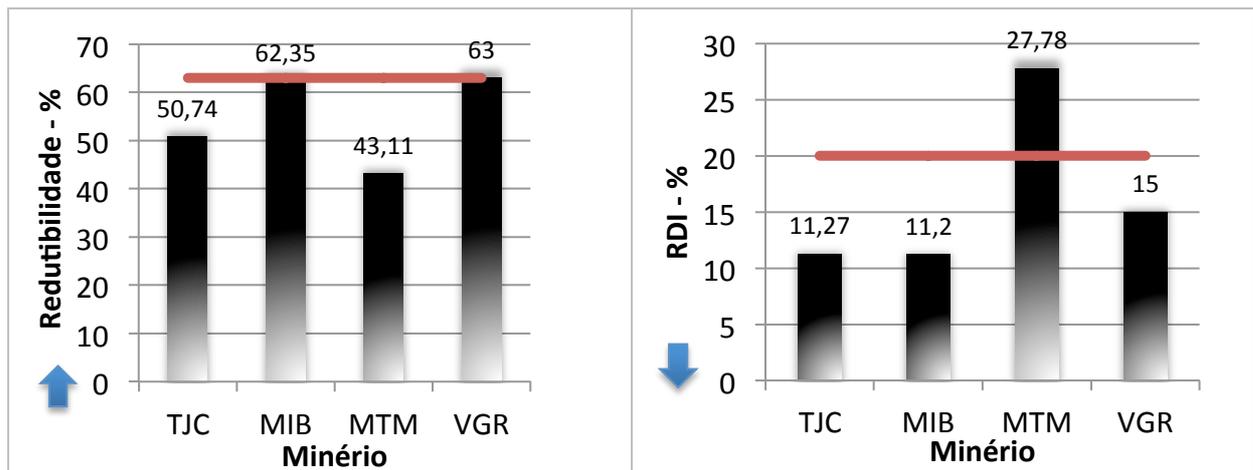


Figura 5.13 – Características dos minérios de ferro em uso na ArcelorMittal Juiz de Fora (Onde TJC, MIB, MTM e VGR são minérios de ferro de origens diferentes).

Pela Figura 5.9 verifica-se que a basicidade que apresentou o maior teor de ferro foi a de valor 1,1. No entanto, analisando-se a mesma figura, verifica-se que os valores do teor de ferro para a faixa de basicidade de 1,0 à 1,4 podem ser considerados como aceitáveis, pois estão próximos de 58%, valores normalmente praticados na ArcelorMittal.

Para o rendimento da sinterização, ver Figura 5.6, considerou-se como valores aceitáveis, aqueles maiores ou igual a 60%, dessa forma os valores de basicidade no intervalo

de 1,0, 1,1, 1,2 e 1,8 atendem a este requisito, sendo o maior rendimento obtido para os experimentos de basicidade igual a 1,0.

De acordo com a curva ajustada na Figura 5.10, o valor de basicidade igual a 1,0 apresentou a maior resistência mecânica a frio. Sendo escolhidos como valores aceitáveis aqueles cuja resistência mecânica ficou acima de 80%, ou seja, os valores de basicidade de 1,0, 1,1, 1,2, 1,6 e 1,8.

Para o índice de redutibilidade considerou-se como referência os minérios em uso na ArcelorMittal Juiz de Fora (ver Figura 5.13), para os quais o índice de redutibilidade atinge o valor máximo de 63%. Pelos experimentos realizados, ver Figura 5.11, verifica-se que os valores de basicidade compreendidos entre 1,2 e 1,8 apresentam índice de redutibilidades acima do valor referência, sendo o maior valor correspondente a basicidade 1,8.

O valor referência para o índice de degradação sob redução adotado foi de 20%, o mesmo adotado para os minérios de ferro na ArcelorMittal Juiz de Fora, ver Figura 5.13. De acordo com os experimentos realizados, ver Figura 5.12, o RDI se mostrou aceitável no intervalo de basicidade compreendido entre 1,1 e 1,8. Sendo 1,8 o melhor valor.

A Tabela 16 foi construída a fim de sintetizar as informações obtidas e permitir a escolha da melhor basicidade para a produção do sinter em função das restrições impostas.

Tabela 16 – Resumo para a escolha da basicidade do sinter.

Característica	Basicidade com valor ótimo	Basicidade com valores aceitáveis	Menor Basicidade a se adotar
Teor de Ferro	1,1	1,0 – 1,4	1,1
Rendimento na sinterização	1,0	1,0 – 1,2 e 1,8	1,0
Resistência mecânica a frio	1,0	1,0 – 1,2 e 1,6 -1,8	1,0
Índice de Redutibilidade	1,8	1,2 – 1,8	<b>1,2</b>
RDI	1,8	1,1 – 1,8	1,1

Dessa forma verifica-se que o valor para a basicidade, deve ser igual a 1,2, por ser este o menor valor que atende as restrições impostas.

## 5.2 Segunda Etapa: Influência do Pó do Balão, Carepa e Pó de Minério

Após a determinação do valor da basicidade a ser utilizada, passou-se a segunda etapa dos testes de sinterização. O objetivo desta etapa foi o de determinar a quantidade dos resíduos que podem ser usados na sinterização. Os resíduos escolhidos para a sinterização foram o pó de minério, carepa de laminação e pó do balão. As características químicas e granulométricas destes e dos demais materiais utilizados são mostradas nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 17 – Composição química dos materiais disponíveis para a segunda etapa de sinterização.

Material	% Fe	% SiO <sub>2</sub>	% CaO	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% MgO	% P	% Mn	% C	% umid.
Finos de carvão vegetal (moinha)	0,14	0,75	1,18	0,15	-	0,09	-	66	8
Pó de carvão vegetal (despoeiramento)	0,17	2,02	3,19	0,15	-	0,90	-	55	8
Finos de minério de ferro Vargem Grande (peneiramento)	65,20	3,69	0,12	0,99	0	0,034	0,04	-	4,1
Finos de minério de ferro Serra Azul (peneiramento)	58,62	13,96	0,18	2,39	0	0,036	0,09	-	4,2
Pó de minério (despoeiramento)	54,2	9,85	6,37	4,42	0,02	0,086	0,30	-	2
Cal	-	4,98	92,2	0,26	0,38	0,021	-	-	-
Carepa de laminação	73,16	0,81	0,15	-	0,19	0,02	0,605	-	3,2
Pó do balão	51,9	8,3	6,3	4,40		0,1	0,4	9,0	3,5

Tabela 18 – Distribuição granulométrica dos materiais disponíveis para a segunda etapa de sinterização.

Material	6,3 mm	4,75 mm	1,0 mm	0,13 mm	<0,13 mm
Finos de carvão vegetal (moinha) (%)	20,3	39,4	27,3	7,9	5,1
Pó de carvão vegetal (desp.) (%)	-	-	-	19,2	80,8
Finos de minério de ferro Vargem Grande (peneiramento) (%)	12,1	35,6	33,7	8,7	9,9
Finos de minério de ferro Serra Azul (peneiramento) (%)	3,4	40,3	32,5	13,3	10,5
Pó de minério (desp.) (%)	-	-	-	16,1	83,9
Cal	-	-	35,6	36,7	27,7
Carepa de laminação	-	5,5	41,3	45,4	7,8
Pó do balão	-	-	-	12,7	87,3

A composição do leito de sinterização, com a quantidade de cada material a ser sinterizado mostrada na Tabela 19, foi obtido através de um balanço de massa, utilizando-se dados das análises químicas apresentadas na Tabela 17.

Tabela 19 – Leito de sinterização para a segunda etapa de sinterização.

Experimento	7.1	7.2	7.3	7.4	8.1	8.2	8.3	8.4
<b>Material</b>								
<b>Finos de minério de ferro V. Grande (pen.) (kg)</b>	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3
<b>Finos de min. de ferro S. Azul (pen.) (kg)</b>	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6
<b>Cal (kg)</b>	4,7	4,6	4,6	4,5	4,4	4,3	4,4	4,2
<b>Moinha CV (kg)</b>	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
<b>Pó de carvão (desp.) (kg)</b>	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
<b>Pó de minério (desp.) (kg)</b>	4,6	4,6	4,6	4,6	0	0	0	0
<b>Carepa (kg)</b>	2,8	2,8	0	0	2,8	2,8	0	0
<b>Pó de balão (kg)</b>	2,8	0	2,8	0	2,8	0	2,8	0
<b>Mistura úmida (kg)</b>	67,8	64,9	64,9	62,0	63,0	60,0	60,1	57,1

A mistura dos materiais e o teste de sinterização seguiu o mesmo procedimento realizado durante a primeira etapa, conforme representado na Figura 5.14.

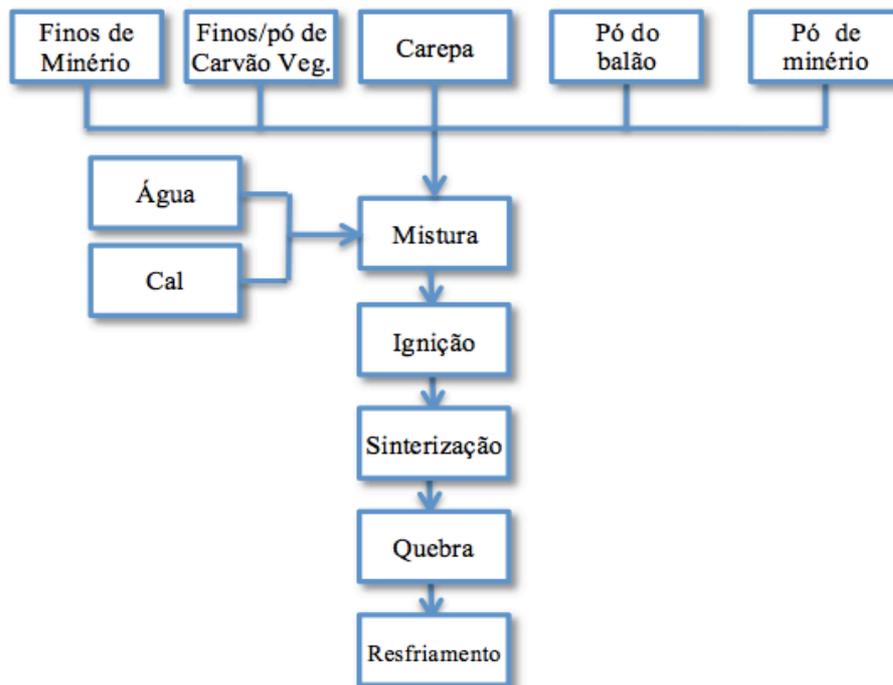


Figura 5.14 – Fluxograma do processo inicial de sinterização usando Carepa, Pó do Balão e Pó de minério.

### 5.2.1 Resultados Obtidos

A fim de quantificar a influência de cada fator e da interação entre eles, foi realizado um experimento fatorial completo  $2^3$ , conforme Tabela 20. Os sinais positivos indicam a presença do resíduo, enquanto, os sinais negativos indicam a sua ausência.

Tabela 20 – Resultados obtidos no planejamento de experimento fatorial completo  $2^3$ .

		<i>Experimento</i>							
		<i>7.1</i>	<i>7.2</i>	<i>7.3</i>	<i>7.4</i>	<i>8.1</i>	<i>8.2</i>	<i>8.3</i>	<i>8.4</i>
<i>Fator / Resposta</i>									
<b>FATOR</b>	A: Pó de minério	+	+	+	+	-	-	-	-
	B: Carepa	+	+	-	-	+	+	-	-
	C: Pó do balão	+	-	+	-	+	-	+	-
<b>RESPOSTA</b>	Rendimento (%)	41,2	62,5	44,1	<b>73,7</b>	54,8	<b>80,2</b>	62,0	<b>72,9</b>
	Resistência a frio (%)	<b>83,3</b>	80,8	79,0	81,0	79,8	<b>85,8</b>	<b>86,8</b>	<b>83,3</b>
	Redutibilidade (%)	58,5	58,3	59,4	58,2	<b>61,7</b>	<b>62,4</b>	<b>61,2</b>	<b>62,0</b>
	RDI (%)	<b>12,6</b>	15,0	<b>12,6</b>	13,7	14,8	<b>11,4</b>	<b>12,0</b>	13,1

Utilizando a tabela 20 é possível observar qual a combinação que obteve os melhores resultados. No entanto, a análise individual de cada resposta ao experimento é realizada nas próximas seções. No apêndice 2 pode-se encontrar outras informações levantadas durante os testes.

### 5.2.2 Influência dos Resíduos no Rendimento da Sinterização

Através da análise do comportamento de cada resposta do experimento fatorial completo, obteve-se o Pareto de Efeitos mostrado na Figura 5.15.

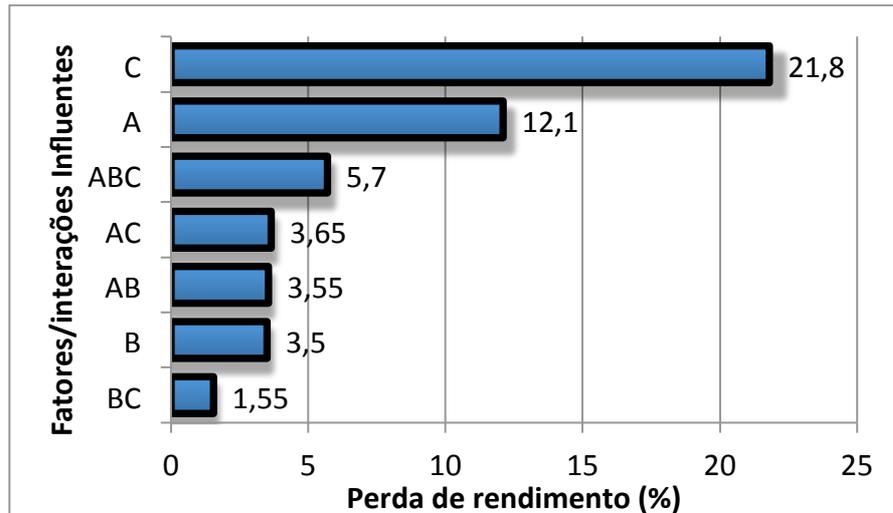


Figura 5.15 – Pareto de efeitos de fatores e interações influentes no rendimento da sinterização.

Os fatores de maior influência no rendimento da sinterização foram o C e o A, ou seja, pó do balão e pó de minério, respectivamente.

De acordo com a análise estatística, representada na Figura 5.16, sempre que o pó de minério (fator A) faz parte do experimento (nível +1), o rendimento da sinterização cai em média 12,1 pontos percentuais. O efeito é maior para o pó do balão (fator C), para este, sempre que o mesmo faz parte da mistura a sinterizar (nível +1), o rendimento da sinterização cai em média 21,8 pontos percentuais. Ou seja, o uso de pós é maléfico ao rendimento da sinterização.

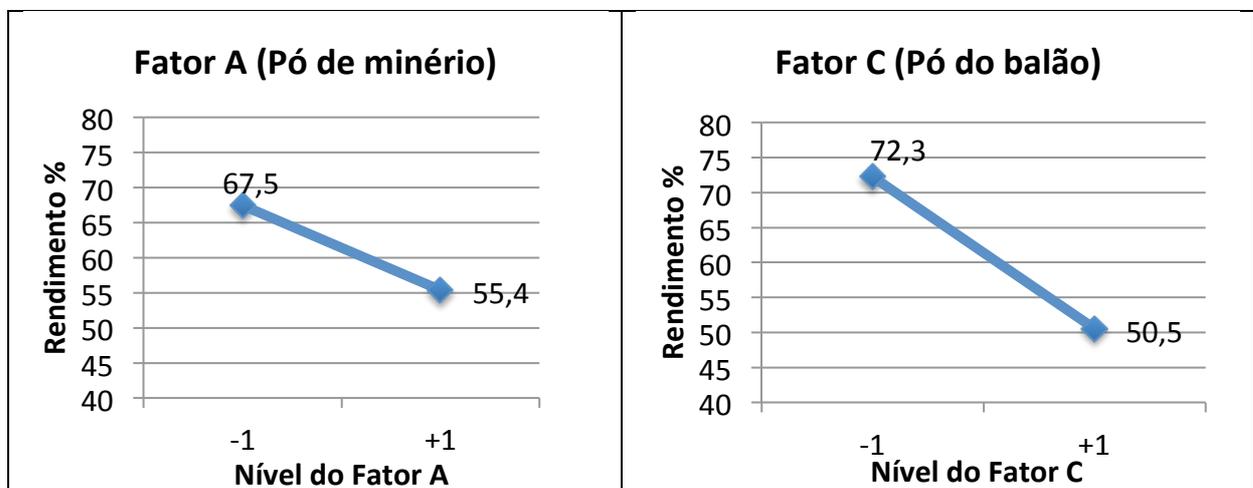


Figura 5.16 – Influência do pó de minério e do pó de balão na sinterização.

A Equação 15, obtida a partir do Planejamento de Experimento, permite, através de interpolação (WERKEMA e AGUIAR, 1996), estimar o rendimento da sinterização em função dos níveis de cada fator.

$$\begin{aligned} \hat{Y} = & 61,425 - 6,05*A - 1,75*B - 10,9*C + \\ & - 1,775*A*B - 1,825*A*C - 0,775*B*C + \\ & + 2,85*A*B*C \end{aligned} \quad (15)$$

Onde:

$\hat{Y}$  = variável resposta esperada, ou seja, rendimento;

A = nível do fator A (pó de minério). Valor entre -1 e +1;

B = nível do fator B (carepa). Valor entre -1 e +1;

C = nível do fator C (pó do balão). Valor entre -1 e +1;

De acordo com a Equação 15, se for utilizado a metade da quantidade de pó de minério (nível de A =0, pois níveis -1 e +1 significam 0 kg e 4,6 kg de pó de minério, respectivamente), usando-se normalmente a carepa (níveis B = +1) e também, metade da quantidade de pó de balão (nível de A =0, pois níveis -1 e +1 significam 0 kg e 2,8 kg de pó de balão, respectivamente) ter-se-ia o rendimento da sinterização igual a 59,7%. No entanto, a redução da quantidade destes resíduos não é a única saída, uma alteração no processo de sinterização necessita ser introduzida conforme discutido a partir da seção 5.2.5.

### 5.2.2 Influência dos Resíduos na Resistência a Frio do Sínter

A análise da variável resposta resistência a frio do sínter, permitiu a construção do Pareto de Efeitos, conforme representado na Figura 5.17. A interação entre os fatores A, B e C, pó do minério, carepa e pó do balão, respectivamente, é responsável pela maior influência na resistência a frio do sínter, seguida do Fator A e interação AB. De acordo com Werkema e

Aguiar (1996), quando uma interação de terceira ordem se destaca, esta deve ser analisada em detrimento de um fator ou interação de segunda ordem.

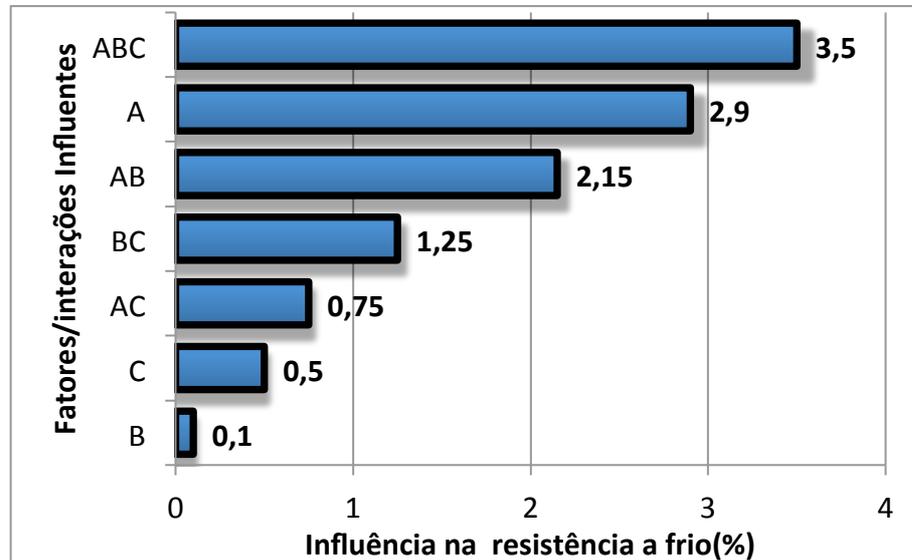


Figura 5.17 – Pareto de efeitos de fatores e interações influentes na resistência a frio do Sínter.

De acordo com representação gráfica da interação ABC, mostrada na Figura 5.18, o melhor resultado para a resistência a frio é obtido para os níveis A- , B- e C+, ou seja, 86,8%.

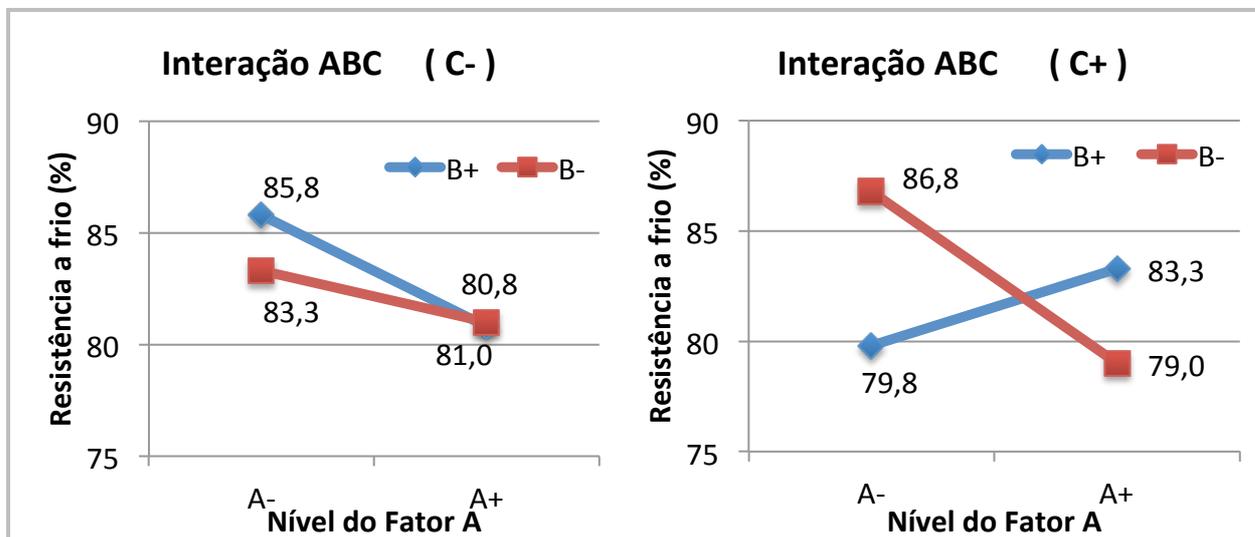


Figura 5.18 – Representação gráfica da interação ABC na resistência a frio.

Mas, interações de terceira ordem (ABC), sugerem a existência de ruídos no processo (WERKEMA e AGUIAR, 1996), os quais devem ser identificados e mitigados. No entanto, os valores da variável resposta ficaram muito próximos, estando compatível com os

resultados determinados na primeira etapa de sinterização. Ou seja, o uso de resíduos não afeta a resistência a frio do sinter de forma a ser tornar proibitivo o seu uso.

### 5.2.3 Influência dos Resíduos na Redutibilidade do Sinter

Os fatores e interações influentes no índice de redutibilidade estão representados na Figura 5.19, através do Pareto de Efeitos. Através deste, verifica-se que o fator com maior influência é o uso do pó de minério.

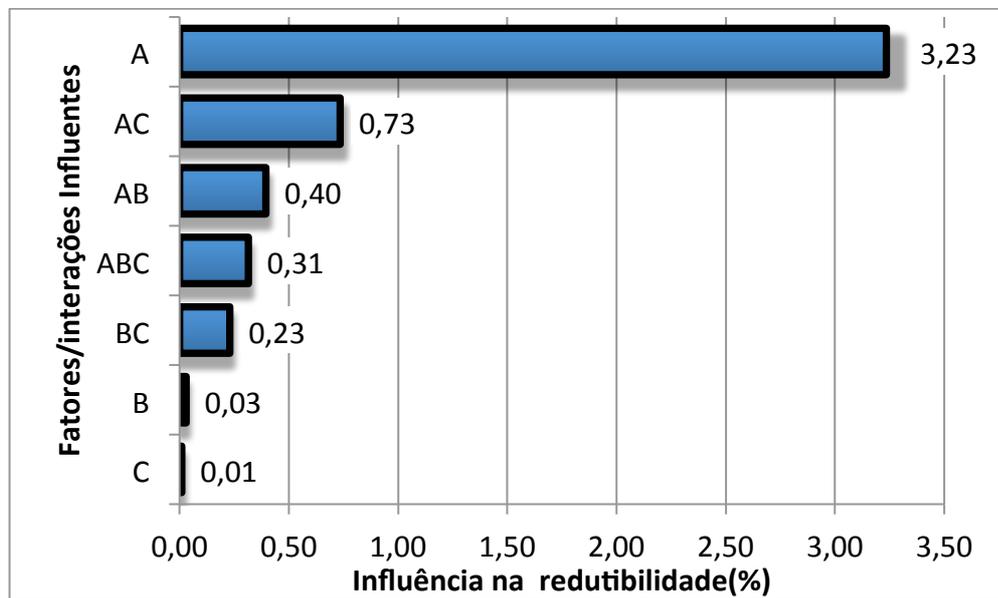


Figura 5.19 – Pareto de efeitos de fatores e interações influentes na Redutibilidade do sinter.

De acordo com o gráfico da Figura 5.20, sempre que o pó de minério (fator A) faz parte do experimento (nível +1), o índice de redutibilidade do sinter cai em média 3,2 pontos percentuais. Esta queda pode ser atribuído ao aumento do percentual de FeO nas amostras com pó de minério onde a média do teor de FeO foi de 16,78% contra 14,9% das amostras que não usaram o pó de minério. Conforme mostrado na Figura 3.9, quanto maior o teor de FeO, menor o índice de redutibilidade. Por outro lado, o maior teor de FeO, pode ser atribuído a maior facilidade de reduzir as partículas mais finas.

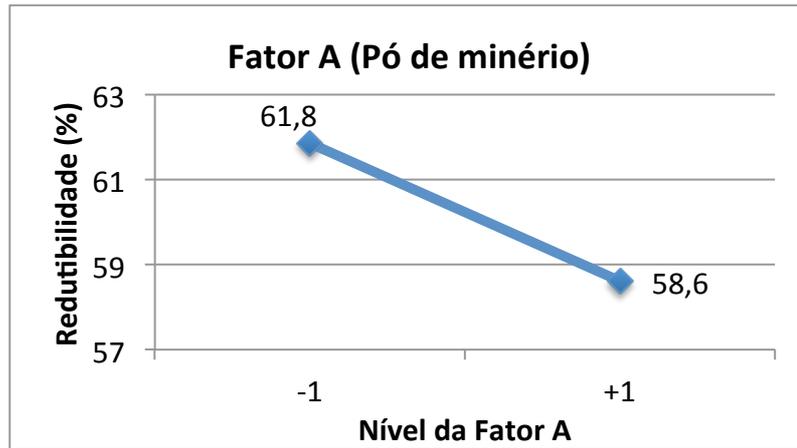


Figura 5.20 – Influência do pó de minério na redutibilidade do sinter.

A perda citada no índice de redutibilidade é considerável, pois implica a perda de produtividade na produção de ferro gusa. A Equação 16, obtida a partir do Planejamento de Experimento, permite, através de interpolação, estimar qual seria a perda no índice de redutibilidade considerando um comportamento linear.

$$\begin{aligned} \hat{Y} = & 60,23 - 1,6175*A + 0,015*B + 0,005*C + \\ & - 0,1975*A*B + 0,3675*A*C - 0,115*B*C + \\ & - 0,1575*A*B*C \end{aligned} \quad (16)$$

Onde:

$\hat{Y}$  = variável resposta esperada, ou seja, índice de redutibilidade;

A = nível do fator A (pó de minério). Valor entre -1 e +1;

B = nível do fator B (carepa). Valor entre -1 e +1;

C = nível do fator C (pó do balão). Valor entre -1 e +1;

De acordo com a Equação 16, se for utilizado a metade da quantidade de pó de minério (nível de A = 0, pois níveis -1 e +1 significam 0 kg e 4,6 kg de pó de minério, respectivamente) e usando-se normalmente a carepa (níveis B +1) e reduzindo-se o pó do balão metade (nível C = 0), a fim de manter a coerência com a alteração proposta no item 5.2.2, ter-se-ia o índice de redutibilidade igual a 60,25%. Valor ainda aceitável, quando se compara com os minérios em uso na ArcelorMittal Juiz de Fora.

Por outro lado, o teor médio de FeO obtido durante o planejamento de experimento, ver Figura 5.21, ficou em 15,85%, que pode ser reduzido através da redução da quantidade de combustível.

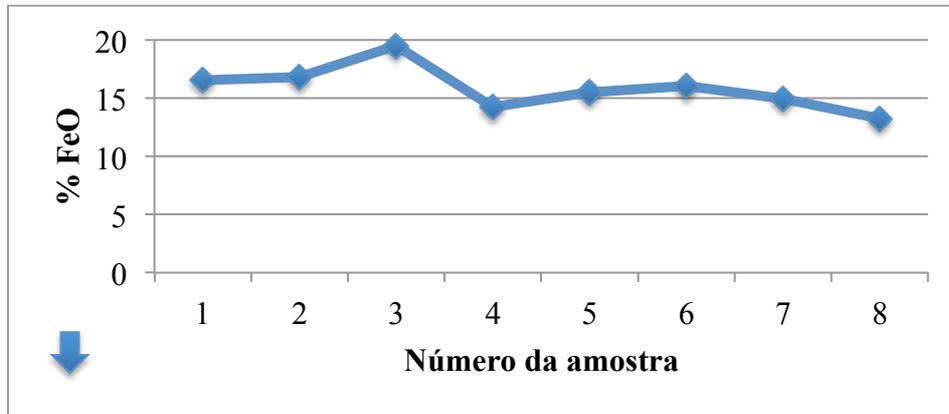


Figura 5.21 – Percentual de FeO obtido no Planejamento de Experimentos.

#### 5.2.4 Influência dos Resíduos no RDI do Sínter

O pareto de efeitos de fatores e interações sob o índice de degradação sob redução, Figura 5.22, mostra que a interação ABC tem a maior influência sobre o RDI do sínter. Conforme mencionado anteriormente, uma interação de terceira ordem que se destaca, deve ser analisada em detrimento de um fator ou interação de segunda ordem.

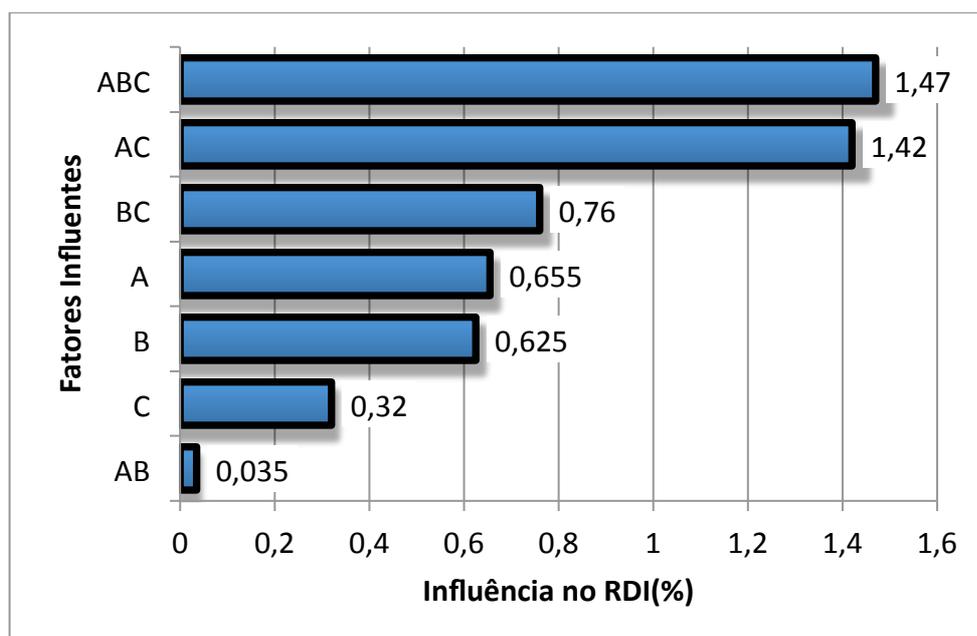


Figura 5.22 – Pareto de efeitos de fatores e interações no índice de degradação sob redução (RDI).

De acordo com representação gráfica da interação ABC, mostrada na Figura 5.23, o melhor resultado para o índice de degradação sob redução (RDI) é obtido para os níveis A- , B+ e C-, ou seja, 11,4%.

No entanto, mesmo o pior valor obtido, pode ser considerado aceitável quando comparado com os minérios atualmente em uso na ArcelorMittal Juiz de Fora, portanto o uso de resíduos não afetou significativamente o índice de degradação sob redução.

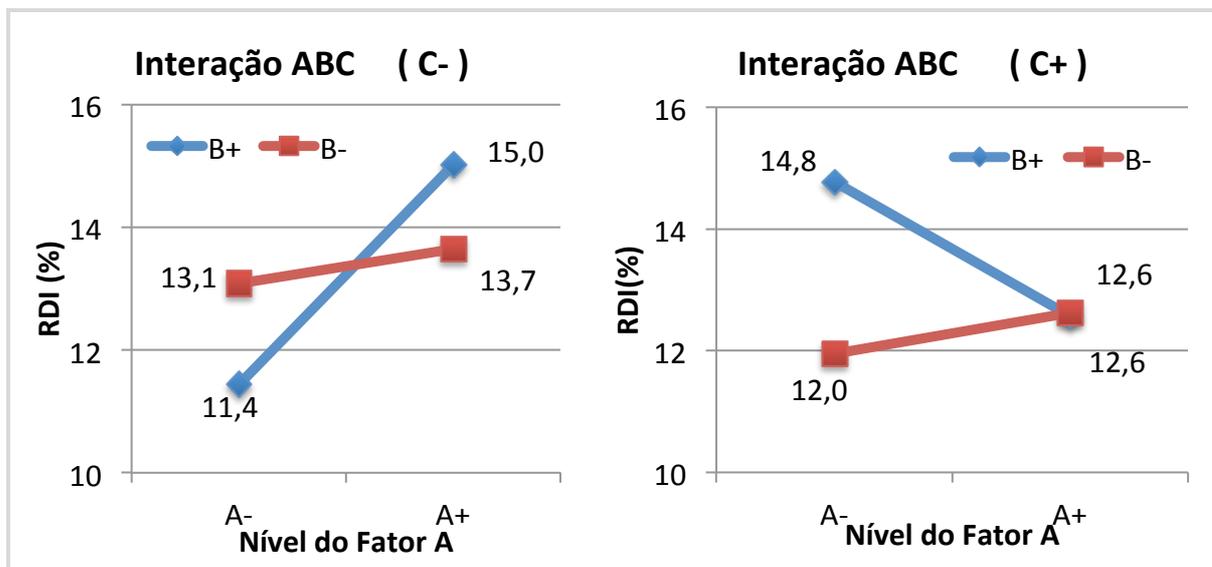


Figura 5.23 – Representação gráfica da interação ABC no RDI do sínter.

### 5.2.5 Correções no Processo e no Leito de Sinterização Para Uso dos Resíduos

Através do planejamento de experimento verificou-se que os pós de minério e do balão são prejudiciais ao rendimento da sinterização. Outra descoberta foi que o uso do pó de minério diminui o índice de redutibilidade. Dessa forma, algumas alterações tanto no processo quanto no leito de sinterização foram necessárias.

Para melhorar o desempenho dos pós de minério e do balão, decidiu-se alterar o processo de mistura, conforme trabalho desenvolvido por Pereira (2004), sendo assim, os pós de minério e do balão foram primeiramente micropelotizados em diâmetros de até 4 mm. Esta ação foi realizada para melhorar a permeabilidade do leito de sinterização, e por consequência

a sinterização de maior quantidade de material. O carvão vegetal e os finos de minério (*sinter feed*) foram adicionados somente após as micropelotas estarem formadas. Conforme demonstrado na Figura 5.24.

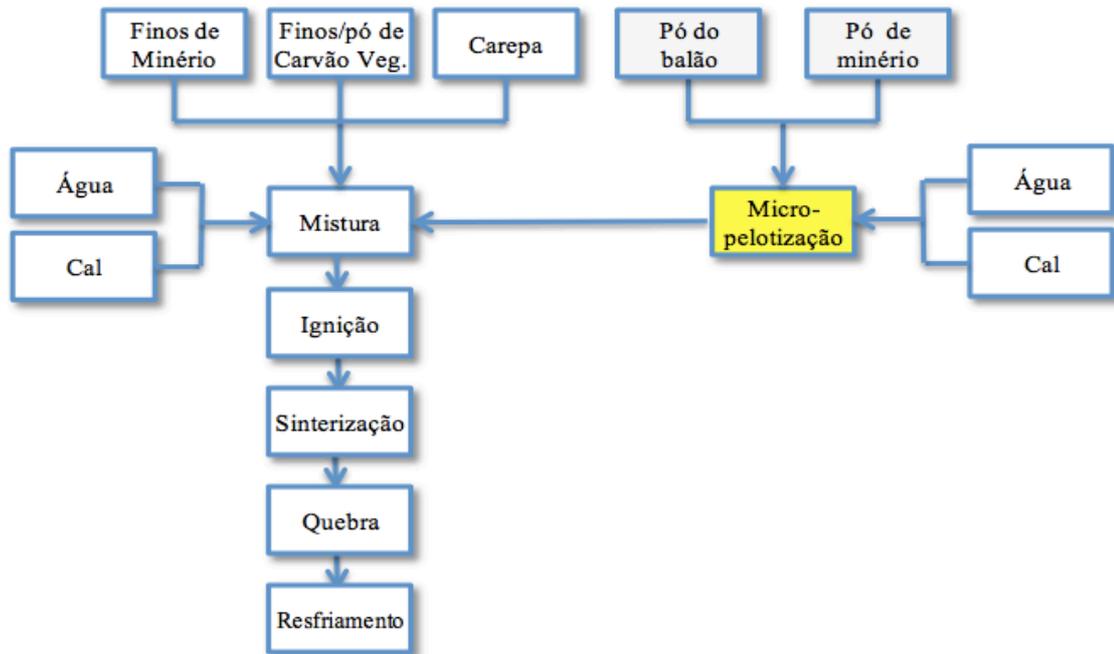


Figura 5.24 – Fluxograma do processo de sinterização alterado, com a inclusão da etapa de micropelotização.

Através da inserção da etapa da micro-pelotização, que em casos reais trata-se de somente da inserção de mais um tambor ou disco, obteve-se pelotas cruas a partir dos pós de minério e balão. A Figura 5.25 mostra uma foto das micro-pelotas obtidas.



Figura 5.25 – Micro-pelotas produzidas com o pó do balão, pó de minério e cal.

A composição do leito de sinterização foi alterado, neste reduziu-se a quantidade de combustível para 5,5 kg no total de carvão vegetal a fim de se reduzir o percentual de FeO no sinter. A quantidade de pó de minério de ferro foi reduzida de 4,6 kg para 2,3 kg, enquanto a quantidade de pó de balão foi reduzida de 2,8 kg para 1,4 kg. Ambas as alterações foram realizadas para verificar as previsões de acordo com as Equações 15 e 16, discutidas nas seções 5.2.1 e 5.2.3. Estas alterações são mostradas na coluna 9.1 da Tabela 21.

Em paralelo foi feito outro teste (coluna 9.2) apenas para verificar e/ou confirmar o efeito de se aumentar a quantidade do pó do balão para 2,8 kg.

Tabela 21 – Leito de sinterização alterado na tentativa de melhorar o rendimento e o índice de redutibilidade.

<b>Experimento</b>	<b>9.1</b>	<b>9.2</b>
<b>Materiais</b>		
Finos de minério de ferro V. Grande (pen.) (kg)	32,3	32,3
Finos de min. de ferro S. Azul (pen.) (kg)	14,6	14,6
Cal (kg)	4,5	4,6
<b>Moinha CV (kg)</b>	<b>5,0</b>	<b>5,0</b>
<b>Pó de carvão (desp.) (kg)</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>
<b>Pó de minério (desp.) (kg)</b>	<b>2,3</b>	<b>2,3</b>
Carepa (kg)	2,8	2,8
<b>Pó de balão (kg)</b>	<b>1,4</b>	<b>2,8</b>
<b>Mistura úmida (kg)</b>	<b>63,4</b>	<b>64,9</b>

### 5.2.6 Análise dos Resultados após Correções no Processo e no Leito de Sinterização Para Uso dos Resíduos

Com as alterações descritas anteriormente, foram realizadas mais duas bateladas de testes, estando os resultados representados na Tabela 22. É muito importante ressaltar que o teste 9.1 é o de interesse para análise nas alterações planejadas no leito de sinterização e, que o teste 9.2, serve apenas para verificar o uso de maior quantidade de pó de balão.

Tabela 22 – Resultados obtidos após ajustes no processo e leito de sinterização.

<i>Experimento</i>	<b>9.1</b>	<b>9.2</b>
<i>Característica</i>		
Rendimento (%)	<b>67,7</b>	61,6
Resistência a frio (%)	<b>84,5</b>	76,8
Redutibilidade (%)	<b>64,1</b>	59,33
RDI (%)	<b>16,54</b>	19,75

### 5.2.6.1 Rendimento da sinterização após Correções

Os resultados do teste 9.1, apresentados na Tabela 22, confirmaram a previsão que a redução a metade da quantidade de pó do balão e de minério faria o rendimento da sinterização subir, sendo 59,7% o valor previsto. De fato este valor subiu mais que o esperado atingindo o valor de 67,7%. Este aumento além do esperado pode ser atribuído, além da redução da quantidade de pós, ao processo de pelotização dos pós conforme fluxograma apresentado na Figura 5.24.

No entanto, de acordo com o teste 9.2, insistindo-se em utilizar maior quantidade de pó do balão (2,8 kg) o rendimento, cai atingindo o valor 61,6%.

### 5.2.6.2 Resistência a frio após Correções

As reduções realizadas nas quantidades de pó de balão e minério, conforme teste 9.1, não afetaram a resistência a frio do sínter, a qual ficou em 84,5%. No entanto, quando aumentou-se a quantidade de pó de balão para 2,8 kg, conforme teste 9.2, o valor da resistência a frio foi bastante afetado, caindo para 76,8%, valor abaixo dos obtidos anteriormente no Planejamento de Experimento descrito no item 5.2.

### **5.2.6.3 Índice de Redutibilidade após Correções**

O índice de redutibilidade apresentou visível melhoria com a redução da quantidade de pó de minério. Conforme mostrado na Tabela 22, para o teste 9.1, o seu valor foi igual a 64,5%. Esta melhora pode ser atribuída, além da redução do pó de minério, a redução da quantidade de carvão vegetal, que conforme discutido anteriormente, influencia o teor de FeO, o qual está diretamente relacionado com o índice de redutibilidade.

No entanto, quando aumentou-se a quantidade de pó de balão para 2,8 kg, conforme teste 9.2, o valor do índice de redutibilidade caiu para 59,33%.

### **5.2.6.4 Índice de Degradação sob Redução após Correções**

O índice de degradação sob redução ficou dentro do esperado. O valor obtido no teste 9.1 foi menor do que o teste 9.2. Estando os dois valores abaixo de 20%, atendendo, portanto, as especificações para os altos-fornos da ArcelorMittal Juiz de Fora.

## 6 CONCLUSÃO

Embora tenha sido necessário se interromper os testes durante a primeira etapa/primeira tentativa, pois os teores de FeO contido no sínter apresentaram valores elevados e grande variabilidade, pode-se verificar a importância do controle e padronização do processo, a fim de evitar conclusões incorretas. Dos resultados encontrados pode-se também estabelecer uma relação entre a resistência mecânica a frio do sínter, ou seja, a resistência do sínter aumenta com o aumento do teor de FeO no mesmo.

Com as condições de testes padronizadas e controladas, verificou-se, através da primeira etapa/segunda tentativa, que a resistência a frio do sínter decresce com o aumento da basicidade na faixa de 1,0 a 1,4. Voltando esta a crescer para basicidades acima de 1,4. O rendimento da sinterização teve o mesmo comportamento da resistência a frio do sínter, caindo e subindo nas mesmas faixas de basicidade. A redutibilidade apresentou valores crescentes com o aumento da basicidade na faixa de 1,0 a 1,8. Já o índice de degradação sob redução (RDI), apresentou ligeiro decréscimo com o aumento da basicidade.

A escolha da basicidade do sínter, objetivando a geração do menor volume de escória em um alto-forno a carvão vegetal, foi feita, não procurando o seu valor ótimo, a fim de atender a todos os parâmetros de qualidade e redução de consumo de combustível, mas sim procurando um valor tal que possua propriedades iguais ou superiores aos minérios de ferro atualmente em uso pela ArcelorMittal Juiz de Fora, pois o objetivo principal deste trabalho foi o de encontrar uma composição alternativa para a *hematitinha*. A basicidade que melhor se encaixou neste contexto foi a de 1,2. A qual propiciou boa resistência a frio, bom rendimento na sinterização, bom índice de degradação sob redução e índice de redutibilidade aceitável, mas não o ideal.

O uso dos resíduos pó de minério (oriundo dos sistemas de despoeiramento), carepa da laminação e pó do balão é viável. Usando o processo tradicional de sinterização, os pós de minério e do balão demonstram ser prejudiciais ao rendimento da sinterização. O uso do pó de minério prejudicou o índice de redutibilidade. O RDI e a resistência a frio do síter não foi alterado pelo uso dos resíduos citados. Realizada alteração no processo de sinterização, introduzindo-se uma fase de micropelotização, e reduzindo-se a quantidade de pó de balão e de minério, mitigou-se os problemas verificados.

Dessa forma verifica-se que o uso de pó de balão, carepa e pó de minério, nos percentuais de 2,2%, 4,4% e 3,6% respectivamente é perfeitamente viável para a produção de síter com valor de basicidade igual a 1,2 com o objetivo de uso nos altos-fornos a carvão vegetal da ArcelorMittal Juiz de Fora.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se que trabalhos futuros verifiquem:

- (i) Propriedades a altas temperaturas do sinter com basicidade igual a 1,2;
- (ii) Produtividade na produção de sínteres com baixa basicidade;
- (iii) Determinação da carga metálica ótima para altos-fornos a carvão vegetal utilizando sínteres com baixa basicidade;
- (iv) Quantificação da redução de consumo de carvão com a utilização de sinter com baixa basicidade;
- (v) Influência do sinter de baixa basicidade na injeção de carvão pulverizado (ICP) nas ventaneiras dos altos-fornos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Marys L. B.; MELO, Gilberto C. B. **Alternativas de usos e aplicações dos resíduos sólidos das indústrias independentes de produção de ferro-gusa do estado de Minas Gerais.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21. 2001, João Pessoa, PB.

ASSUNÇÃO, F. C. R. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: Gestão de coprodutos.** Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008. 28p. [Nota técnica]

BRASIL. **Código Penal Decreto-Lei nº 3.914, de 9 de dezembro de 1941.** Lei de introdução do Código Penal (decreto-lei n. 2.848, de 7-12-940) e da Lei das Contravenções Penais (decreto-lei n. 3.688, de 3 outubro de 1941). Diário Oficial 11/12/1941.

BRASIL. **Decreto 6.514, de 22 de julho de 2008.** Dispõe sobre as infrações e sanções administrativas ao meio ambiente, estabelece o processo administrativo federal para apuração destas infrações, e dá outras providências. Diário Oficial da União de 23/07/2008, p. 1.

BRASIL. **Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998.** Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Diário Oficial de 13/02/1998, p. 1.

BRASIL. **Resolução CONAMA 420, de 28 de dezembro de 2009.** Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Diário Oficial da União nº 249, de 30/12/2009, págs. 81-84.

CASSOLA, M.S.; MORAES, S. L. **Aspectos tecnológicos do efeito de aglomerantes na microestrutura de Pelotas de concentrados de minério de ferro.** Revista Metalurgia e Materiais da ABM, v. 63, setembro de 2007, São Paulo, Brasil.

CUNHA, A.F.; ARAÚJO FILHO, G.; MARTINS JÚNIOR, A.; GOMES, Olídio C.B.; ASSIS, P.S. **Aspectos técnicos da utilização da carepa gerada em processos siderúrgicos e tratada por desagregação ultra-sônica.** Tecnologia em Metalurgia e Materiais, v.3, n.2, p.1-5, São Paulo, 2006.

DAWSAN, P.R. **Recent Developments in Iron Ore Sintering - Part 1 Introduction.** Ironmaking and Steelmaking, v. 20,n.2, p. 135-136, 1993 a.

DAWSAN, P.R. **Recent Developments in Iron Ore Sintering - Part 2 Research studies on sintering and sinter quality.** Ironmaking and Steelmaking, v. 20,n.2, p. 137-143, 1993 b.

FALCO, Angelo. **Produção De Sinter Com Baixo Volume De Escória Para Alto Forno A Carvão Vegetal Utilizando Minério De Carajás,** In: Seminário de Redução de Minério de Ferro, 31. 2000, Santos, SP.

FEAM. **Inventário de resíduos sólidos industriais: ano base 2010 / Fundação Estadual do meio Ambiente.** Belo Horizonte: Feam, 2011.

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 sinter para os altos-fornos.** 2005. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

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

JANUZZI, Aécio. **Análise da aglomeração a frio no processo HPS (Hybrid Pelletized Sinter) com ênfase nas matérias-primas envolvidas.** 2008. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

KOKURU, H.; TAGUCHI, S.; TSUCHIYA, N.; SASAKI, A.; KATO, A.; OKUMURA, K. **Burden design for the blast furnace,** In: McMaster University Symp, 12. 1984, Hamilton, ON, Canada.

KURKIN, V.M.; TABAKOV, M.S.; KASHKAROV, E.A.; GURKIN, M.A.; DETKOVA, T.V.; RESHETKIN, S.V. **Effect of Lime on Sintering.** Metallurgist, v.51, n.8, p.49-52, 2007.

LANKFORD, W.T. Jr.; SAMWAYS, N. L.; CRAVEN, R.F.; MCGANNON, H.E. **The Making, Shaping and Treating of Steel,** 10.ed., Pittsburgh (USA): The AISE Steel Foundation, 1985. cap.5, p.304-312.

LOO, C.E. Some progress in understanding the science of iron ore sintering. In: ICSTI/IRONMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS, p. 1299-1316, 1998.

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

MALYSHEVA, T. Ya.; YUSFIN, Yu. S.; MANSUROVA, N.R.; GIBADULIN, M.F.; LEKIN, V.P. **Mechanism of Mineral Formation and Metallurgical Properties of Sinter of Basicity 1.1-3.1 at OAO MMK.** Steel in Translation, v. 7, n. 2, p 126-130, 2007.

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.

MASON, Robert L.; GUNST, Richard L.; HESS, James L. **Statistical Design and Analysis of Experiments with Applications to Engineering and Science.** 2 ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2003.

MOURÃO, José M. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: 2008-2025.** Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008. 50p. [Nota técnica]

MOURÃO, Marcelo B. (coord.). **Introdução a Siderurgia,** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

MOURÃO, Marcelo B. *et al.* **Siderurgia para não siderurgistas. Programa de Educação Continuada**, São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003.

NIWA, Y.; KOMATSU, O.; NODA, H.; SAKAMOTO, N.; OGAWA, S. **Development of Hybrid Pelletized Sinter Process and its commercial operation at Fukuyama n5 sintering plant**. Ironmaking Conference Proceedings, 1990, p. 683-689.

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, 56(4): p. 249-254, out/dez 2003a.

OLIVEIRA, Mirian C.; MARTINS, Jader. **Caracterização e classificação do resíduo sólido “pó do balão”, gerado na indústria siderúrgica não integrada a carvão vegetal: Estudo de um caso na região de Sete Lagoas/MG**. Revista Química Nova, v. 26, n. 1, p. 5-9, 2003.

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**. 2004. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SAMPAIO, Ronaldo S. **Uso de carvão vegetal em mini altos-fornos. Panorama no Setor Siderúrgico – situação atual com tendências 2025**. São Paulo: CGEE, 2008. 15p. [Nota técnica]

SUSAKI, Katsujiro. **Fundentes e Escorificantes. Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico – situação atual com tendências 2025**. São Paulo: CGEE, 2008. 25p. [Nota técnica]

TELLES, Victor B. **Reciclagem da poeira de aciaria elétrica na sinterização de minério de ferro visando a eliminação de zinco**. 2010. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) Universidade de São Paulo, São Paulo.

TEO, C.S.; WATERS, A.G.; NICOL, S.K. **Quantification of the breakage of lump materials during handling operations**. International Journal of Mineral Processing, v. 30: p. 159-184. 1990.

UMADEVI, T. *et al.* **Influence of Pellet Basicity (CaO/SiO<sub>2</sub>) on Iron Ore Pellet Properties and Microstructure**. ISIJ International, v. 51, n. 1, p. 14–20, 2011.

VIEIRA, Cláudio B *et al.* **Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras: uma análise crítica**. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 56(2): p.97-102, abr. jun. 2003.

WERKEMA, M.C.C., AGUIAR, S. **Planejamento e análise de experimentos: como identificar as principais variáveis influentes em um processo**. Belo Horizonte: Fundação Cristiano Ottoni, EE UFMG, 1996.

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.

## Apêndice 1 - Folha de dados da Primeira Etapa/ Segunda Tentativa de Caracterizar o Sínter em Função da Basicidade

Nr teste	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	4.1	4.2	5.1	5.2	5.3	6.1	6.2	6.3
Basicidade teórica	1,3	1,4	1,2	1,1	1	1	1,1	1	1,4	1,8	1,6	1,6	1,8
Data	21/abr	21/abr	21/abr	01/mai	01/mai	01/mai	01/mai	05/mai	05/mai	05/mai	07/jun	07/jun	07/jun
SF Vargem Grande (kg)	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
SF Serra Azul (kg)	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
Cal (kg)	5,4	5,8	4,9	4,4	4	4	4,4	4	5,8	7,7	6,7	6,7	7,7
Moinha CV (kg)	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	7,6	7,6	4,5	5	5	5	5,5	5,5
Mistura umida (kg)	62,9	63,3	62,4	61,9	61,5	63,6	64	60,5	62,8	64,7	63,7	64,2	65,2
Água (l)	5,5	6,5	4,7	5	5,2	5,3	5,5	5,5	6,7	8,5	7,5	8	8,5
t bentoneira (min)	4	4	4	5	4	5	5	10	10	10	10	10	8
Tmáx (°C)	1099	1187	1044	1184	1045	1159	1196	981	1016	1122	1073	1120	1180
t sínter (min)		6,7	6,7	10	7,46	8,6	8,9	8	8,3	8,1	7,5	7,4	8
h leito (mm)	360	380	365	355	360	395	395	325	330	325	345	340	325
Qtd sínter prod. >6,3mm	26,4	27,1	33,8	36	39	40,2	39,5	19,4	24,65	38,75	27,55	33,75	34,2
<b>Resultados</b>													
Rendimento sínter	46,0%	46,9%	59,4%	63,8%	69,6%	71,8%	70,0%		42,6%	64,9%	46,9%	57,5%	57,3%
Ensaio Shutter	80,0%	80,5%	82,0%	83,8%	86,1%	86,0%	86,5%		77,3%	83,8%	80,0%	82,7%	85,3%
retido na malha de 25 mm	17,8%	18,0%	18,8%	19,0%	18,5%	19,8%	20,0%	22,3%	24,5%	35,0%	24,40%	27,80%	15,10%
retido na malha de 19 mm	22,8%	27,5%	25,3%	49,5%	46,8%	49,8%	53,0%	20,9%	23,3%	25,8%	28,20%	31,50%	39,00%
retido na malha de 9,5 mm	39,5%	35,0%	38,0%	15,3%	16,0%	16,5%	13,5%	32,3%	29,5%	23,0%	27,40%	23,40%	31,20%
retido nas malhas de 19 e 25mm	40,5%	45,5%	44,0%	68,5%	65,3%	69,5%	73,0%	43,2%	47,8%	60,8%	52,6%	59,3%	54,1%
TMP	12,5	13,1	13,1	15,6	15,0	16,0	16,4	12,6	13,3	15,8	14,1	15,2	14,1
%FeO	17,39%	18,2%	16,2%	11,2%	10,1%	17,6%	18,0%		8,97%	11,2%	9,60%		
%Fe	57,18%	57,1%	58,5%	56,5%	57,1%	57,0%	58,7%		56,8%	54,8%	56,10%		
%SiO <sub>2</sub>	6,49%	6,80%	6,65%	6,90%	6,99%	6,70%	6,83%		6,86%	6,74%	6,6		
%CaO	8,7%	9,3%	8,2%	7,9%	7,2%	6,5%	7,3%		9,3%	11,4%	10,3		
Basicidade real	1,34	1,37	1,24	1,15	1,03	0,97	1,07		1,36	1,69	1,56		
Redutibilidade	63,13	65,92	64,16	65,8	61,6	62	61,31		65,04	70,71	67,1		
RDI	14,68	16,45	19,87	18,06	19,85	20,61	18,22		14,37	13,64	15,1		
Velocidade de queima (mm/min)		56,72	54,48	35,50	48,26	45,93	44,38	40,63	39,56	40,21	46,10	46,10	40,63

### Observações:

- 1) O teste 5.1 foi rejeitado, pois devido a pouca quantidade de carvão vegetal utilizada praticamente não houve a sinterização do material.
- 2) Não são apresentadas as análises de redutibilidade e RDI para os testes 6.2 e 6.3, pois as amostras foram misturadas pelo laboratório contratado para as referidas análises

## Apêndice 2 - Folha de dados da Segunda Etapa: Influência do Pó de Balão, Carepa e Pó de Minério

Nr teste	7.1	7.2	7.3	7.4	8.1	8.2	8.3	8.4	9.1	9.2
Basicidade teórica	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Data	19/jul	19/jul	20/jul	20/jul	20/jul	23/jul	23/jul	23/jul	23/ago	24/ago
SF Vargem Grande (kg)	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3	32,3
SF Serra Azul (kg)	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6
Cal (kg)	4,7	4,6	4,6	4,5	4,4	4,3	4,4	4,2	4,5	4,6
Moinha CV (kg)	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5	5
Pó de carvão	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5
Pó de minério	4,6	4,6	4,6	4,6	0	0	0	0	2,3	2,3
Carepa	2,8	2,8	0	0	2,8	2,8	0	0	2,8	2,8
Pó de balão	2,8	0	2,8	0	2,8	0	2,8	0	1,4	2,8
Mistura úmida (kg)	67,8	64,9	64,9	62	62,9	60	60,1	57,1	63,4	64,9
Água (l)	6,5	5,4	7,1	7,3	6,5	7,1	5,6	6,5	5,5	5,5
t bentoneira (min)	8,53	12,58	9,57	9,54	9,38	11	5,4	8,47	8	7
Tmáx (°C)	1226	1204	1208	1078	1043	1078	1095	899	1180	1106
t sinter (min)	11,80	10,11	11,20	13,11	15,73	9,87	12,25	10,24	11,5	9,5
h leito (mm)	320	275	312,5	307,5	290	340	325	345	315	320
Qtd sinter prod. >6,3mm	25,45	36,8	26	41,25	31,2	43,3	33,55	37,25	39,2	36,6
<b>Resultados</b>										
Rendimento sinter	41,2%	62,5%	44,1%	73,7%	54,8%	80,2%	62,0%	72,9%	67,7%	61,6%
Teste de Queda (Shatter)	83,3%	80,8%	79,0%	81,0%	79,8%	85,8%	86,8%	83,3%	84,5%	76,8%
retido na malha de 25 mm	11,5%	27,0%	21,5%	19,0%	21,5%	23,8%	24,0%	17,3%	29,3%	19,0%
retido na malha de 19 mm	33,5%	23,3%	24,8%	30,5%	26,8%	33,3%	30,5%	29,5%	29,8%	30,0%
retido na malha de 9,5 mm	38,3%	30,5%	30,5%	31,5%	31,5%	28,8%	32,3%	36,5%	25,5%	27,8%
retido nas malhas de 19 e 25mm	45,0%	50,3%	46,3%	49,5%	48,3%	57,0%	54,5%	46,8%	59,0%	49,0%
TMP	12,9	14,1	13,0	13,5	13,5	15,0	14,9	13,4	15,4	13,1
%FeO	16,53%	16,8%	19,5%	14,2%	15,5%	16,0%	14,9%	13,2%	11,01	11,91
%Fe	56,17%	58,1%	55,1%	55,8%	56,1%	56,6%	56,7%	56,2%	56,47	58,27
%SiO <sub>2</sub>	6,90%	6,75%	6,98%	6,44%	6,61%	6,89%	6,68%	7,02%	6,65	6,38
%CaO	8,21%	8,38%	7,93%	8,04%	7,86%	7,54%	8,12%	8,27%	8,17	8,2
Basicidade real	1,19	1,24	1,14	1,25	1,19	1,09	1,22	1,18	1,23	1,29
Redutibilidade (%)	58,53	58,33	59,44	58,15	61,74	62,38	61,23	62,04	64,1	59,33
RDI (%)	12,57	15,02	12,62	13,65	14,77	11,44	11,95	13,08	16,54	19,75
Velocidade de queima (mm/min)	27,13	27,20	27,90	23,46	18,44	34,46	26,54	33,69	27,39	33,68

### Observações:

- 1) Os testes 7.1 a 8.4 se referem ao Planejamento de Experimento para os três resíduos testados.
- 2) Os testes 9.1 e 9.2 se referem a ajustes feitos no leito de sinterização na tentativa de melhorar o rendimento e a redutibilidade do sinter, prejudicados pelo uso de pó do balão e de minério.

## Anexo 1 – Legislação Ambiental

A Legislação Ambiental Brasileira está entre as mais avançadas e completas do mundo. Trata-se de uma legislação consolidada, onde as infrações são claramente definidas, havendo uniformidade e gradação adequadas. Abaixo é feita a reprodução de trechos da Legislação Ambiental destacando-se as penas e multas para aqueles que cometerem crimes ambientais:

**Lei nº 9.605**, de 12 de fevereiro de 1998

**Art. 54.** Causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora:

Pena - reclusão, de um a quatro anos, e multa.

§ 1º Se o crime é culposo:

Pena - detenção, de seis meses a um ano, e multa.

§ 2º Se o crime:

I - tornar uma área, urbana ou rural, imprópria para a ocupação humana;

II - causar poluição atmosférica que provoque a retirada, ainda que momentânea, dos habitantes das áreas afetadas, ou que cause danos diretos à saúde da população;

III - causar poluição hídrica que torne necessária a interrupção do abastecimento público de água de uma comunidade;

IV - dificultar ou impedir o uso público das praias;

V - ocorrer por lançamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos, ou detritos, óleos ou substâncias oleosas, em desacordo com as exigências estabelecidas em leis ou regulamentos:

Pena - reclusão, de um a cinco anos.

§ 3º Incorre nas mesmas penas previstas no parágrafo anterior quem deixar de adotar, quando assim o exigir a autoridade competente, medidas de precaução em caso de risco de dano ambiental grave ou irreversível.

**Código Penal Decreto-Lei nº 3.914**, de 9 de dezembro de 1941

**Art. 270.** Envenenar água potável, de uso comum ou particular, ou substância alimentícia ou medicinal destinada a consumo:

Pena – reclusão, de dez a quinze anos. Pena com a redação dada pela Lei nº 8.072 de 25 de julho de 1990.

Modalidade culposa

§ 2º Se o crime é culposos:

Pena – detenção, de seis meses a dois anos.

**Art. 271.** Corromper ou poluir água potável, de uso comum ou particular, tornando-a imprópria para consumo ou nociva a saúde:

Pena – reclusão, de dois a cinco anos.

Modalidade culposa

Parágrafo único. Se o crime é culposos:

Pena – detenção, de dois meses a um ano.

**Decreto 6.514**, de 22 de julho de 2008.

Art. 61. Causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da biodiversidade:

Multa de R\$ 5.000,00 (cinco mil reais) a R\$ 50.000.000,00 (cinquenta milhões de reais).

Parágrafo único. As multas e demais penalidades de que trata o caput serão aplicadas após laudo técnico elaborado pelo órgão ambiental competente, identificando a dimensão do dano decorrente da infração e em conformidade com a graduação do impacto.

Art. 62. Incorre nas mesmas multas do art. 61 quem:

I - tornar uma área, urbana ou rural, imprópria para ocupação humana;

II - causar poluição atmosférica que provoque a retirada, ainda que momentânea, dos habitantes das áreas afetadas ou que provoque, de forma recorrente, significativo desconforto respiratório ou olfativo devidamente atestado pelo agente autuante;

. Inciso com redação dada pelo Decreto 6.686/08

III - causar poluição hídrica que torne necessária a interrupção do abastecimento público de água de uma comunidade;

IV - dificultar ou impedir o uso público das praias pelo lançamento de substâncias, efluentes, carreamento de materiais ou uso indevido dos recursos naturais;

V - lançar resíduos sólidos, líquidos ou gasosos ou detritos, óleos ou substâncias oleosas em desacordo com as exigências estabelecidas em leis ou atos normativos;

VI - deixar, aquele que tem obrigação, de dar destinação ambientalmente adequada a produtos, subprodutos, embalagens, resíduos ou substâncias quando assim determinar a lei ou ato normativo;

VII - deixar de adotar, quando assim o exigir a autoridade competente, medidas de precaução ou contenção em caso de risco ou de dano ambiental grave ou irreversível; e

VIII - provocar pela emissão de efluentes ou carreamento de materiais o perecimento de espécimes da biodiversidade.

Parágrafo único. As multas de que trata este artigo e demais penalidades serão aplicadas após laudo de constatação.