

Dissertação de Mestrado

“Adequação granulométrica das matérias-primas e do sistema de segregação contínua (I.S.F), para melhorias na produtividade e qualidade do sínter para os altos-fornos”

Autor: Edilson Pinto Honorato

Orientador: Prof. Dr. Ing. Varadarajan Seshadri

Dezembro/2005

ADEQUAÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS MATÉRIAS-PRIMAS E DO
SISTEMA DE SEGREGAÇÃO CONTÍNUA (I.S.F), PARA
MELHORIAS NA PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DO SÍNTER
PARA OS ALTOS-FORNOS

Dissertação de mestrado a ser apresentada ao Curso de
Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da
Universidade Federal de Minas Gerais

Autor: Edilson Pinto Honorato

Orientador: Prof. Dr. Ing. Varadarajan Seshadri

Área de concentração: Metalurgia Extrativa

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2005

À minha esposa, Edivânia e meus filhos
Gustavo e Gabriele

Agradecimentos

O autor agradece a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na preparação deste trabalho e, em particular:

- À USIMINAS, especialmente à Gerência Técnica da Superintendência da Área de Redução, pela oportunidade e apoio à realização deste trabalho;
- À UFMG, especialmente ao Prof. Dr Varadarajan Seshadri, pela orientação;
- Ao Eng^o. Glailson Mattos de Araújo filho, pela co-orientação na elaboração desta dissertação;
- À funcionária Daniela Bonfim Luna pela ajuda na digitação e formatação deste documento;
- Aos colegas de trabalho da sinterização: José Aládio Domingues Guimarães, Gustavo Serrano dos Santos, supervisores e operadores das máquinas de sinterizações da USIMINAS; pela ajuda na realização das amostragens industriais, imprescindíveis para a realização deste trabalho;
- Aos funcionários do Centro de Pesquisas da USIMINAS: Luís Augusto Marconi Scudeller, Guilherme Camilo, Mônica Suede Santos Silva, José Roberto Magalhães, pelo excelente trabalho na preparação e realização de testes de caracterização das amostras de mistura e sinter industrial;
- Aos gerentes: Antônio José dos Santos e José Mauro Cota, pela minha liberação em algumas atividades para a realização de estudos e preparação deste trabalho;
- Ao Eng. Henriquison M. Bottrel Reis pela a acessória e dicas na formatação estrutural deste documento.

Sumário

1. Introdução	1
2. Objetivo.....	4
3. Revisão Bibliográfica.....	5
3.1. <i>Processo de Sinterização.....</i>	5
3.1.1. Definição e conceitos	5
3.1.2. Micropelotização da mistura a sinterizar	6
3.1.3. Zonas de Sinterização	12
3.1.4. Reações de Sinterização e formação dos constituintes mineralógicos do sinter	16
3.2. <i>Características do Minério de Ferro para Sinterização.....</i>	19
3.2.1. Características Químicas	19
3.2.2. Características Físicas	21
3.3. <i>Fundentes para Sinterização.....</i>	32
3.4. <i>Combustíveis para Sinterização.....</i>	35
3.5. <i>Técnicas de Segregação Contínua de Mistura na Esteira.....</i>	36
3.5.1. Evolução dos conceitos - Carregamento de mistura em dupla camada	36
3.5.2. Sistema I.S.F (“Intensified Sifting Feeder”)	38
4. Metodologia Experimental.....	43
4.1. <i>Metodologia para Caracterização da Mistura Antes de Sinterizar.....</i>	45
4.2. <i>Metodologia para Análise do Sinter Diretamente da Esteira Industrial para Caracterização.....</i>	47
4.3. <i>Caracterização Física e Metalúrgica do Sinter Produzido – Descrição dos Testes</i>	49
4.3.1. Teste de Choque, <i>Shatter Test</i>	49
4.3.2. Teste de Tamboramento, <i>Tumbler Test (T.T)</i>	49
4.3.3. Índice de Degradação Sob Redução (RDI)	49
4.3.4. Redutibilidade , RI	49
4.3.5. Ensaio de Amolecimento e fusão sob carga – Método Usiminas	50
4.3.6. Microscopia Quantitativa em fases – Método Usiminas.....	50
4.4. <i>Determinação/Testes com Nova Granulometria do Serpentinó</i>	51
5. Resultados e Discussão	52
5.1. <i>Adequação Granulométrica dos Constituintes da Mistura de Sinterização</i>	52
5.1.1. Avaliação das Eficiências de Segregação Química e Granulométrica de Misturas de Sinterização com o I.S.F a 45°	53
5.1.2. Adequação da Distribuição Granulométrica de Combustíveis e Fundentes ..	54

5.1.3. Efeito da Adequação Granulométrica das Matérias-Primas sobre a Eficiência de Segregação e Qualidade do Sínter.....	58
5.2. <i>Desempenho Operacional das Máquinas de Sinterização</i>	61
5.3. <i>Efeito do Engrossamento do Serpentinó na Qualidade e Propriedades do Sínter</i>	68
5.3.1. Teste Industrial.....	68
5.3.2. Indicadores Operacionais – Sinterização Nº 3.....	69
5.3.3. Comparação e caracterização do sínter produzido com serpentinó normal e grosso.....	71
6. Conclusões	81
7. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	83
Referências Bibliográficas.....	84
Publicações do Autor Relacionados com o Trabalho	87
8. Anexo.....	88

Lista de Figuras

FIGURA 3.1 – Característica típica de um misturador. ⁽¹⁾	7
FIGURA 3.2 – Efeito da umidade na permeabilidade da misturas, segundo Carneiro et alii, citado por Najjar et alii	8
FIGURA 3.3 – Influência da micro-pelotização na distribuição granulométrica da mistura.....	9
FIGURA 3.4 – Movimento das partículas no misturador, segundo <i>Nippon Steel Corporation</i> , citado por Najjar et alii	10
FIGURA 3.5 – Influência da cal fina na permeabilidade e na eliminação dos super-finos da mistura, segundo Poggio et alii, citado por Najjar et alii	11
FIGURA 3.6 – Esquema de troca de calor no leito de sinterização, segundo Muniz et alii, citado por Najjar et alii.....	13
FIGURA 3.7 – Corte longitudinal de um leito de sinterização em um instante qualquer, segundo Najjar et alii.....	15
FIGURA 3.8 – Corte transversal e perfil térmico de um leito de sinterização em um instante qualquer, segundo Leite et alii, citado por Najjar et alii.....	15
FIGURA 3.9 – Distribuição granulométrica ideal para a mistura de minérios (curva de Astier), segundo Carneiro et alii, citado por Honorato et alii.....	22
FIGURA 3.10 – Fotomicrografia de micro-pelotas em mistura a sinterizar.....	23
FIGURA 3.11 – Poder de aglomeração a frio de materiais diversos em função do tempo de misturamento, segundo Sugawara et alii, citado por Honorato et alii.....	25
FIGURA 3.12 – Combinação de minérios diferentes em função da proporção aderente/nucleante, segundo Sugawara et alii, citado por Honorato et alii.....	26
FIGURA 3.13 – Texturas típicas de minérios brasileiros hematíticos (MEV - 100X) – Centro de pesquisa da USIMINAS.	30
FIGURA 3.14 – Influência de concentrado de minério itabirítico na produtividade da sinterização.....	30
FIGURA 3.15 – Esquema da região afetada por trinca no bolo de <i>sinter</i>	31
FIGURA 3.16 – Estrutura da quase partícula e da estrutura do sínter com o novo método de granulação proposto por Oyama et alii.....	33
FIGURA 3.17 – Detalhe da modificação de dosagem do cálcario e coque fino proposto por Oyama et alii	33
FIGURA 3.18 – Esquema das duas linhas de abastecimento de mistura.....	37

FIGURA 3.19 – Esquema do sistema duplo de abastecimento da esteira.	37
FIGURA 3.20 – Diferença de carregamento: convencional e I.S.F.....	39
FIGURA 3.21 – Distribuição granulométrica na camada de mistura.	39
FIGURA 3.22 – Distribuição da densidade na camada de mistura.....	40
FIGURA 3.23 – Desenho esquemático dos sistemas de carregamento com chapa deflectora e I.S.F.	41
FIGURA 3.24 – Cortes transversais do leito de mistura a sinterizar.	41
FIGURA 3.25 – Foto do mini segregador de mistura da C.V.R.D.	42
FIGURA 4.1 – Fotos do I.S.F parado e em operação na sinterização nº 3 da USIMINAS.	43
FIGURA 4.2 – Desenho esquemático do sistema de carregamento de mistura com I.S.F.	44
FIGURA 4.3 – Procedimento para retirada da “mistura crua” numa esteira industrial de sinterização.....	46
FIGURA 4.4 – Esquema de identificação de amostra de mistura no setor das máquinas de sinterização (unidade: mm).	47
FIGURA 4.5 – Método de amostragem do sínter na esteira durante operação de uma planta industrial.....	48
FIGURA 4.6 – Esquema adotado para a identificação das amostras de sínter nas máquinas industriais de sinterização (unidade: mm).	48
FIGURA 5.1 – Distribuição dos teores de C, CaO e MgO e do tamanho médio de partículas da mistura granulada da MS2, antes e após a instalação do I.S.F.	54
FIGURA 5.2 – Distribuição granulométrica real da mistura da MS2.....	55
FIGURA 5.3 – Distribuição dos teores de C, CaO e MgO e do tamanho médio de partículas da mistura granulada da MS2, antes e após a adequação das matérias-primas. ...	59
FIGURA 5.4 – Qualidade física e metalúrgica do sínter da MS2, ao longo da altura de camada, antes e após a adequação das matérias-primas.	60
FIGURA 5.5 – Caracterização mineralógica quantitativa dos sínteres da MS2.	61
FIGURA 5.6 – Evolução da produtividade na sinterização nº 2 da Usiminas.	62
FIGURA 5.7 – Evolução da produtividade na sinterização nº 3 da Usiminas	63
FIGURA 5.8 – Evolução do ritmo de produção em ton/h na sinterização nº 2 da Usiminas.....	63
FIGURA 5.9 – Evolução do ritmo de produção em ton/h na sinterização nº 3 da Usiminas.....	64
FIGURA 5.10 – Evolução do rendimento do sínter na sinterização nº 2 da Usiminas	64
FIGURA 5.11 – Evolução do consumo de combustíveis sólidos (coque + antracito), na sinterização nº 2 da Usiminas.....	65

FIGURA 5.12 – Redução do SiO ₂ do sinter na sinterização nº 2 da Usiminas.....	66
FIGURA 5.13 – Elevação do teor de Ferro total do sinter na sinterização nº 2 da Usiminas.....	66
FIGURA 5.14 – Evolução da resistência à degradação do sinter à queda, na sinterização nº 2 da Usiminas.....	67
FIGURA 5.15 – Evolução da resistência física do sinter à abrasão, na sinterização nº 2 da Usiminas.....	67
FIGURA 5.16 – Redução do <i>slag rate</i> dos altos-fornos da Usiminas, após redução no volume de escória do sinter produzido nas sinterizações da Usiminas.....	68
FIGURA 5.17 – Comparações de granulometria do serpentinito: Normal e Grosso.....	69
FIGURA 5.18 – Indicadores de processo e qualidade do sinter produzido com o serpentinito de granulometria normal e grosso.....	70
FIGURA 5.19 – Distribuição do teor de MgO na mistura e no sinter com serpentinito de granulometria normal e grosso.....	72
FIGURA 5.20 – Caracterização da resistência física do sinter no setor, produzido industrialmente com o serpentinito de granulometria normal e grosso.....	72
FIGURA 5.21 – Caracterização do índice de degradação sob redução (RDI) do sinter, produzido industrialmente com o serpentinito de granulometria normal e grosso.....	74
FIGURA 5.22 – Caracterização do índice de redutibilidade do sinter, produzido industrialmente com o serpentinito de granulometria normal e grosso.....	75
FIGURA 5.23 – Caracterização mineralógica quantitativa do sinter produzido com serpentinito normal e grosso.....	75
FIGURA 5.24 – Microestruturas dos sínteres produzidos com serpentinito de granulometria normal.....	77
FIGURA 5.25 – Microestruturas dos sínteres produzidos com serpentinito de granulometria grosseira.....	78
FIGURA 5.26 – Temperatura de início de amolecimento e da diferença (final – início do amolecimento) simulando o sinter no alto-forno.....	79

Lista de Tabelas	Pg
Tabela III.1 – Descrição geral dos tipos e das características intrínsecas de partículas do <i>sinter feed</i> de minérios de ferro brasileiros e da estrutura ideal do microaglomerado produzido na etapa de aglomeração a frio (Ishikawa et alii, 1982; Araújo filho et alii, 1986; Rosière, 1996; Vieira,1999).	29
TABELA V.1 – Ajustes da distribuição granulométrica dos combustíveis sólidos, fundentes e minérios tipo <i>sinter feed</i>	57

Resumo

Uma das características do processo tradicional de sinterização é a heterogeneidade térmica e de intensidade de reações ao longo da altura da camada do leito. As reações de sinterização, as quais refletem o nível térmico do processo, são pouco desenvolvidas na região superior e ocorrem excessivamente na região inferior da camada, resultando em sínteres de qualidade bem distintas. Objetivando a homogeneização da intensidade das reações, com o balanceamento térmico mais adequado, foi desenvolvido um novo acessório para o sistema de carregamento de misturas, denominado *Intensified Sifting Feeder* – I.S.F, que promove, ao longo da altura do leito de sinterização, a segregação granulométrica e química da mistura.

Na Usiminas, com a implantação do I.S.F em suas máquinas de sinterização, foram desenvolvidos estudos para a adequação das especificações granulométricas de suas matérias-primas, visando melhor explorar os benefícios gerados pelo novo sistema de carregamento.

Os objetivos deste são: i) consolidar a melhoria de desempenho das sinterizações após instalação do I.S.F. e ajustes granulométricos dos componentes da mistura a sinterizar; ii) ajustes granulométrico no serpentinito para obter um sínter com a melhor qualidade física e metalúrgica para os altos-fornos. O programa de estudo envolverá o levantamento de dados, apresentando a melhoria do desempenho das sinterizações após instalação dos I.S.F's e ajustes granulométricos dos componentes da mistura a sinterizar, bem como novas amostragens de misturas antes de sinterizar e do sínter produto, após novos ajustes de granulometria do serpentinito.

Abstract

One of the characteristic features of the traditional sintering process is the non uniformity of the reaction intensity in the vertical direction of the sinter bed. The sintering reactions, which reflect the heat level of the process, proceed insufficiently in the upper layer and excessively in the lower layer of the sinter bed. This results in sinter with different quality along the height of the sinter bed. The idea of homogenization of the reaction with heat balancing by producing carbon segregation in the upper layer of the sinter bed can be traced back to the old period. However, this situation has now significantly changed with the advent of a new accessory to the mixture charging system, called the “Intensified Sifting Feeder – I.S.F”. This device promotes a favourable size segregation of the mixture in the sinter bed leading to a gain in permeability.

With a proper size distribution of the fuels, fluxes and even the iron ore it is possible to reduce the reaction and thermal heterogeneity by moving preferentially the fuel and fluxes to the upper regions of the bed.

With the installation of I.S.F in Usiminas sintering machines, several studies have been developed aiming to generate support data for improving size specifications of raw materials.

The objectives of this study are i) consolidate the performing increase of sintering machine after the installation of I.S.F and granulation of the mixture components to be sinter. ii) adjustment granulation in serpentine to get the sinter if a better physical and metallurgical quality for the blast furnaces. The study program will involve the data statistics, shoeing a better sintering performance after the I.S.F installation and granulation adjustment of mixture components to be sinter, as well as new samples of mixtures before sintering and sinter cake, after new granulation adjustment in serpentine.

1. Introdução

Uma das características do processo tradicional de sinterização é a heterogeneidade térmica e de intensidade de reações ao longo da altura da camada do leito. As reações de sinterização, as quais refletem o nível térmico do processo, são pouco desenvolvidas na região superior e ocorrem excessivamente na região inferior da camada, resultando em sínteres de qualidades bem distintas.

A idéia de homogeneização da intensidade das reações, com o balanceamento térmico mais adequado a partir da segregação de carbono, é antiga. Exemplo disso foi o desenvolvimento do processo de sinterização em dupla camada, com a mistura de sinterização sendo carregada em duas camadas distintas, tendo a camada superior maior quantidade de combustível. Processo este abandonado devido ao elevado custo operacional.

A grande evolução, entretanto, veio com o advento de um novo acessório para o sistema de carregamento de misturas, denominado *Intensified Sifting Feeder* – I.S.F, o qual é responsável por promover, ao longo da altura de camada, uma segregação granulométrica da mistura granulada no leito de sinterização, com o deslocamento das partículas maiores para a região inferior e as menores para a região superior do leito, resultando na elevação do índice de vazios e conseqüente ganho de permeabilidade.

Atuando-se nas distribuições granulométricas dos combustíveis, fundentes e, até mesmo, minérios de ferro é possível alterar a distribuição desses materiais ao longo da camada, deslocando-os, preferencialmente, para uma determinada região do leito. Isto permite a redução da heterogeneidade térmica e de reações com a maior concentração de combustível e fundentes nas regiões superiores. Como resultados tem-se as elevações do rendimento de síter e da produtividade, redução do consumo de combustível sólido e melhoria das propriedades metalúrgicas do síter produto.

Na Usiminas, com a implantação do I.S.F em suas máquinas de sinterização, foram e estão sendo desenvolvidos estudos para a adequação das especificações granulométricas

de suas matérias-primas, visando melhor explorar os benefícios gerados por este sistema de carregamento. Todos os estudos na Usiminas foram realizados com o I.S.F posicionado a 45° em relação a horizontal, posição esta, que, para as plantas de sinterização da Usiminas, maximiza a segregação granulométrica dos componentes da mistura a sinterizar.

A análise da quantidade intrínseca das matérias-primas utilizadas na sinterização favorece a formulação otimizada de misturas, beneficiando o rendimento do processo, além da produção de sínteres com propriedades químicas, físicas e metalúrgicas adequadas à estabilidade operacional do alto-forno.

Dentro desse contexto, verifica-se a importância do estudo dos tipos de fundentes, quantidades e granulometrias adotadas na sinterização. Isso porque esses compostos, dentre outras funções, são responsáveis pelas reações de escorificação do processo, portanto, determinantes da resistência à degradação sob redução em baixas temperaturas do sínter produzido. Além disso, o controle operacional da sinterização, notadamente quanto à permeabilidade do leito, tem relação direta com a distribuição granulométrica dos fundentes, dando a entender que, quanto maior a sua granulometria sem comprometer a qualidade química, física e metalúrgica do sínter, maior a permeabilidade do leito aumentando conseqüentemente, a produtividade numa sinterização.

Caso um fundente se apresente numa granulometria excessiva grosseira, a teoria afirma que ele não reage durante a queima, principalmente, se os mesmos posicionarem nas partes superiores de um leito de sinterização, recirculando no processo como finos de retorno. Por outro lado, deve-se verificar com cautela os menores níveis das frações finas, sob o ponto de vista da permeabilidade, de modo que se mantenha o alto nível de produção do processo. Assim sendo, deve-se conciliar esses dois extremos, para que com isso, consiga-se otimizar o uso dos fundentes, tornando-os um parceiro na busca dos melhores resultados para os sínteres produzidos.

Em geral, as siderúrgicas brasileiras têm demonstrado preferência pelo uso de fundentes silicatados (serpentinito- $\text{Mg}_6(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$) como fonte de MgO, ao invés dos carbonatos (dolomita- $(\text{Ca},\text{Mg})(\text{CO}_3)_2$) para melhoria das propriedades a quente do sinter dentro do alto-forno. Devido, principalmente, a reatividade do primeiro ser melhor que o segundo, melhorando a qualidade física do sinter e produtividade das plantas de sinterização.

A presença de MgO no sinter apresenta uma certa influência nas características físicas e metalúrgicas do sinter, como também nas variações na mineralogia do sinter. Em sinter básico com CaO pode haver formação de ferritos de cálcio (binários, ternários e quaternários), silicatos vítreos e cristalinos, além de hematita e magnetita. Com a elevação do MgO substituindo o CaO, aumenta a formação de espinélio de magnésio ($(\text{MgFe})\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), ferritos de magnésio (Fe_2MgO_4), magnésio-wustita, magnetita, hematita reoxidada, escória vítrea, olivina, piroxênio, enquanto que diminui a formação de hematita primária, ferritos de cálcio e dicálcio silicato. Constituintes estes que podem diminuir a resistência física do sinter. Sendo assim uma otimização do local de formação destes constituintes torna-se necessário. Um caminho para isso, é atuar na granulometria do serpentinito (principal fonte do MgO) e com a ajuda de um equipamento de segregação contínua, direcionar as partículas para locais onde a resistência física do sinter já é maior (fundo da esteira). Isto pode ser conseguido engrossando a sua granulometria, pois, com um segregador contínuo, estas partículas poderá ser direcionada para o fundo da esteira da sinterização.

2. Objetivo

O objetivo deste estudo, é numa primeira etapa, consolidar a melhoria de desempenho das sinterizações da USIMINAS, após ajustes granulométricos dos componentes da mistura a sinterizar e instalação do equipamento de segregação contínua de mistura (I.S.F), instalado nas sinterizações 2 e 3. Numa segunda etapa, alterar a distribuição granulométrica do serpentinito atualmente em consumo e analisar sua influência nas propriedades físicas e metalúrgicas do sínter produzido para os altos-fornos.

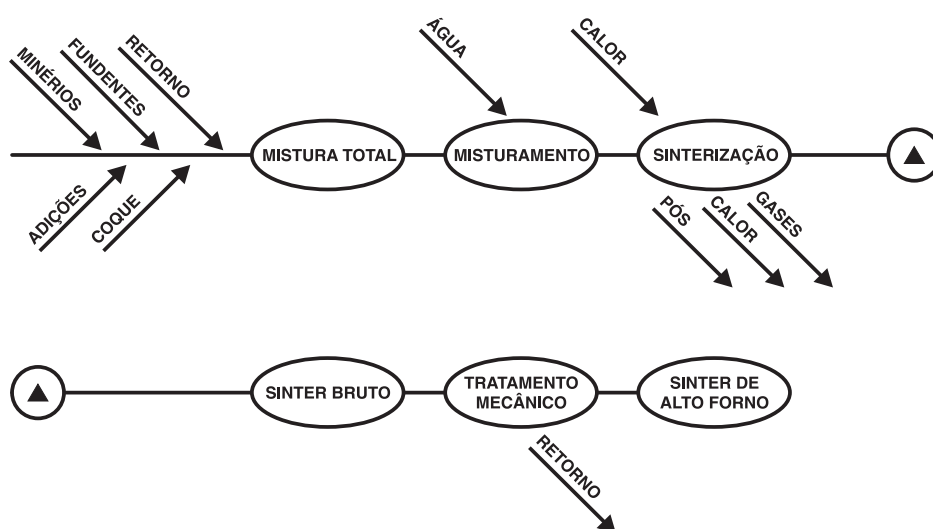
3. Revisão Bibliográfica

3.1. Processo de Sinterização

3.1.1. Definição e conceitos⁽¹⁾

A sinterização é um processo de aglomeração a quente de uma mistura de finos de minérios, coque, fundentes e adições, com dosagens e composições químicas definidas, cujo produto resultante, o sínter, apresenta características químicas, físicas e metalúrgicas compatíveis com as solicitações do alto-forno.

O processo de sinterização pode ser melhor definido conforme esquema abaixo:



As principais características exigidas para o sínter são:

- ◆ Não conter elementos químicos indesejáveis para o alto-forno;
- ◆ Composição química estável;
- ◆ Elevado teor de ferro;
- ◆ Baixo volume de escória;
- ◆ Elevada resistência mecânica;
- ◆ Granulometria estável;
- ◆ Baixa porcentagem de finos;

- ◆ Baixa degradação sob redução;
- ◆ Possuir alta redutibilidade;
- ◆ Baixo consumo de combustível.

Os sínteses são definidos genericamente como:

- ◆ **NÃO AUTO-FUNDENTE:** Quando é proveniente de minério hematítico ou magnetítico com estéril de sílica e ao qual não se acrescenta nenhuma base (CaO ou MgO).
- ◆ **AUTO-FUNDENTE:** O minério pode ser o mesmo anterior. Mas são acrescentadas algumas bases para correção da composição química. Podem ser ácidos, quando a relação CaO/SiO_2 for inferior a 1, ou básico, quando esta relação for superior a 1.

3.1.2. Micropelotização da mistura a sinterizar⁽¹⁾

Homogeneização e umidificação da mistura⁽¹⁾: Atualmente, grande parte dos sinterizadores estão dando muita importância ao tratamento da mistura. Consegue-se, através de uma adequação da mesma, aumentar a permeabilidade do leito, reduzir o consumo de coque e aumentar a produtividade, e minimizar a dispersão química e física do sinter.

O misturador (figura 3.1), além de ser o equipamento responsável pela homogeneização e micro-pelotização da mistura, promove também a adição de água para controle da umidade deste material.

Para desempenhar as funções de homogeneização da mistura e micro-pelotização das partículas através da adição de água, o misturador normalmente possui na parte interna, respectivamente, ressaltos saliente (200mm) em 40% do seu comprimento e ressaltos menores (30mm) na parte restante.

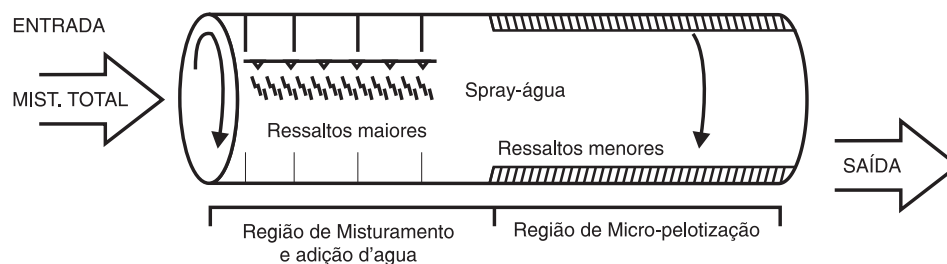


FIGURA 3.1 – Característica típica de um misturador.⁽¹⁾

A influência e o controle da umidade na formação das micropelotas⁽¹⁾. A umidade nas instalações mais recentemente implantadas é controlada automaticamente. A medição é realizada automaticamente, e a dosagem de água é feita no misturador com o sistema já tendo conhecimento da umidade e da massa de mistura que entraram para correção.

A umidade está tão diretamente relacionada ao processo de sinterização que seu controle deve ser rigoroso para não correr o risco de perda de produção, consumo elevado de combustível e má qualidade do síter.

O controle de umidade está relacionado com a granulometria da mistura pois, quando a mistura a sinterizar apresenta maiores concentrações granulométricas na faixa inferior a 150mesh, o acréscimo na adição de água em conjunto com a ação do misturador, permite maior formação de micro-pelotas, melhorando com isto, a permeabilidade da mistura; por outro lado, a mistura excessivamente granulada necessita, às vezes, para controle da permeabilidade, da diminuição da água adicionada.

A figura 3.2 a seguir ilustra os reflexos do controle de umidade nos rendimentos, na produção e na permeabilidade da mistura.

A determinação mais genérica da permeabilidade da mistura é:

$$P = \frac{Q}{A} \times \left(\frac{H}{S} \right)^n$$

Onde:

P = Permeabilidade do leito ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{min}$)

Q = Vazão do gás que atravessa o leito (m^3/min)

A = Área da máquina (m^2)

H = Altura da camada do leito (m)

S = Depressão sob a esteira (mmH_2O)

n = Expoente ligado ao tipo de escoamento gasoso ($n=0,6$)

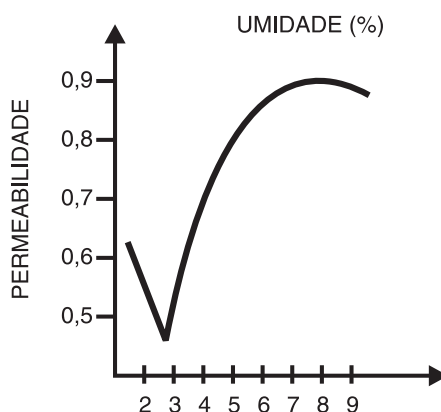


FIGURA 3.2 – Efeito da umidade na permeabilidade da misturas, segundo Carneiro et alii, citado por Najar et alii⁽¹⁾

Observa-se, que o aumento da umidade da mistura é benéfico à permeabilidade da mesma e à produção de sinter devido à maior formação de micro-pelotas. A elevação da umidade além de um certo nível, promove o encharcamento da matéria-prima com conseqüente destruição das micro-pelotas e alargamento da zona de condensação no processo de formação do sinter, refletindo negativamente na produtividade.

A distribuição granulométrica da mistura, antes e depois do misturador pode ser bem compreendida através da figura 3.3.

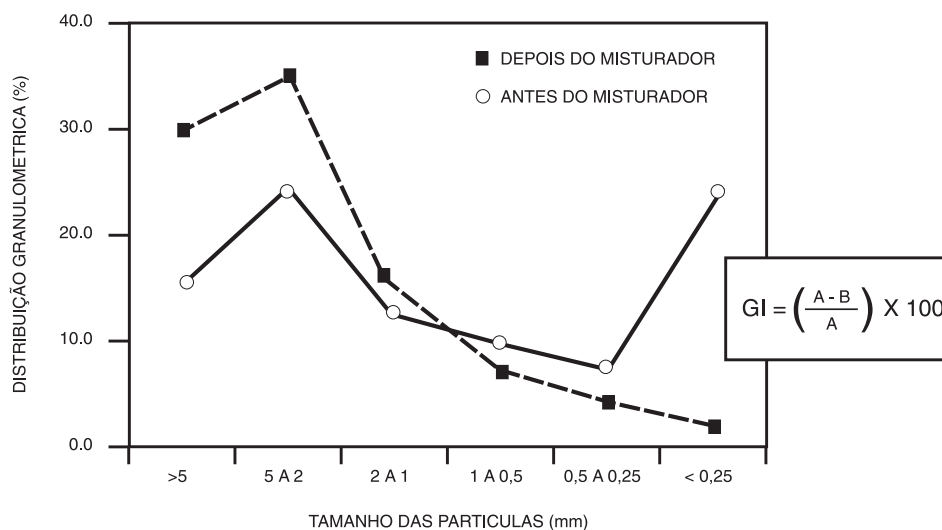


FIGURA 3.3 – Influência da micro-pelotização na distribuição granulométrica da mistura.⁽³⁾

Quanto à figura anterior, o tamanho médio da mistura após o misturador é maior que na estrada do mesmo, devido à diminuição da fração menor que 0,25mm pela formação das micro-pelotas.

A avaliação da eficiência da micro-pelotização pode ser traduzida com o auxílio do índice de granulação (G.I), cuja fórmula matemática está descrita abaixo:

$$G.I = \left(\frac{A+B}{A} \right) \times 100$$

A = Partículas Primárias <0,25mm(g)

B = <0,25mm após Micro-Pelotização

A influência e o controle do misturamento na formação das micro-pelotas⁽¹⁾: No caso específico da micro-pelotização, esta pode ser traduzida pela união de partículas através de tensões superficiais, onde grãos grossos (nucleantes) servem como base para aderência de grãos finos (aderentes).

A formação das micro-pelotas depende do movimento das partículas dentro do misturador, o qual é regido pelas características do equipamento, assim como do fator de ocupação e do tempo de retenção do material do equipamento.

A figura 3.4 mostra modelos de movimentos possíveis das partículas dentro do misturador em relação ao seu fator de ocupação (volume de mistura) e a sua rotação.

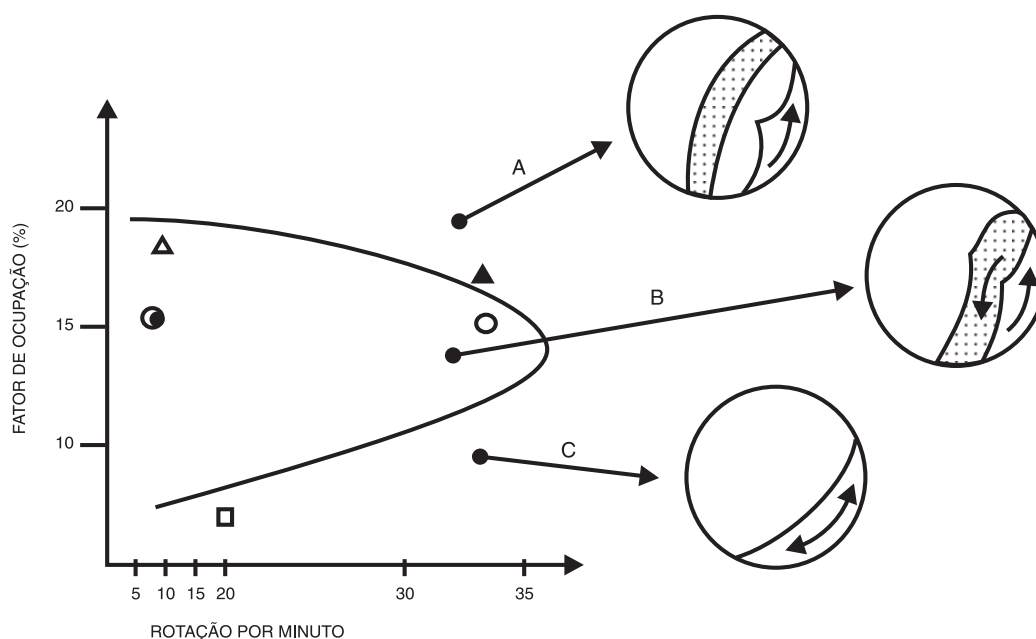


FIGURA 3.4 – Movimento das partículas no misturador, segundo *Nippon Steel Corporation*, citado por Najar et alii⁽¹⁾

⇒ **Sendo que:** Fator de ocupação = Volume de material no misturador/ Volume do misturador

Em relação à figura anterior, o movimento **A**, chamado de **catarata** tem a característica de formar as micro-pelotas em um primeiro estágio, para posterior destruição das mesmas logo após. O movimento **C**, ou de **escorregamento**, não tem poder suficiente para promover um contato efetivo entre grãos aderentes e nucleantes, sendo portanto também ineficaz. O movimento **B**, ou movimento de **cascata** permite um contato intenso entre as partículas, sem as destruir posteriormente, sendo, neste caso, o desejado no que diz respeito a um maior índice de granulação da mistura.

A influência de um agente aglomerante na formação das micro-pelotas⁽¹⁾: A adição de agentes aglomerantes na mistura a sinterizar visa acelerar a união das partículas no misturador, ao mesmo tempo em que aumenta a capacidade de retenção do aglomerado e evita a desintegração dos grânulos no ato de compactação e secagem do material na esteira. A quantidade de partículas aderidas é diretamente proporcional ao percentual usado do agente aglomerante.

De todos os materiais que incrementam a micro-pelotização, o que melhor se comporta em termos de índice de granulação é a cal fina.

A figura 3.5 confirma a influência da adição de cal fina na eliminação dos super-finos da mistura.

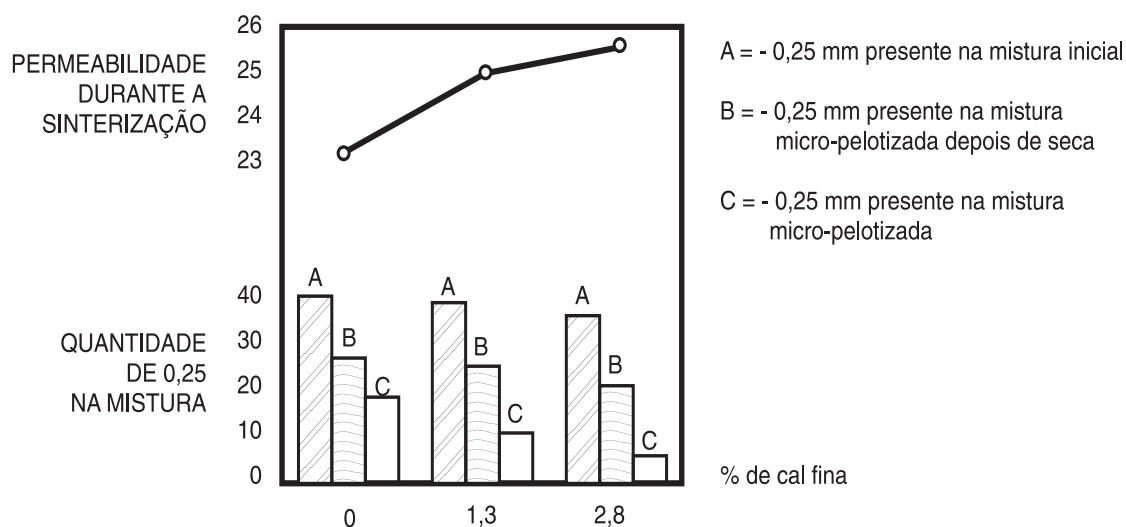


FIGURA 3.5 – Influência da cal fina na permeabilidade e na eliminação dos super-finos da mistura, segundo Poggio et alii, citado por Najar et alii⁽¹⁾

De acordo com a figura 3.5, o aumento da porcentagem de cal fina adicionada à mistura diminui a quantidade de menor que 0,25mm livre presente no material micro-pelotizado, aumentando, assim, a permeabilidade da mistura.

Em termos de consumo específico de coque, o uso de cal também é benéfico ao processo de sinterização, principalmente devido a dois fatores:

- Substituição de um carbonato (calcário) por um material calcinado (cal fina).
- A hidratação da cal libera calor, aumentando a temperatura da mistura (em menor escala).

3.1.3. Zonas de Sinterização⁽¹⁾

O mecanismo de sinterização de minério de ferro é determinado pelo desenvolvimento de dois fenômenos distintos:

- ◆ O fenômeno físico de transferência de calor da camada superior para a inferior do leito de sinterização, proporcionada pela sucção forçada de ar, criando uma fonte térmica cuja velocidade de propagação é proporcional à vazão de ar e definindo duas regiões distintas: uma de concentração térmica maior (região inferior) e outra menor (região superior do leito sinterizado);
- ◆ O fenômeno químico de combustão do coque contido na mistura a sinterizar que, produzindo calor, gera uma frente de reações químicas, cuja evolução é função da reatividade, da qualidade de combustível e da umidade e composição química e granulométrica da mistura.

Estes dois fenômenos são inteiramente dependentes entre si, pois o combustível só entra em combustão, desencadeando o processo, após a mistura atingir uma certa temperatura, determinada pela reatividade do próprio combustível.

Além disso, a existência dos dois fenômenos, transferência de calor e reações químicas, resulta na formação de uma zona de reações termo-químicas no leito da mistura a sinterizar, gerando outras zonas com características diversas, cujos desenvolvimentos resultam na formação do mecanismo global de aglomeração a quente, que será estudado detalhadamente a seguir.

O fenômeno de transferência de calor e o fenômeno químico de combustão do coque, ocorrendo simultaneamente, definem as "zonas de sinterização" e assim todo o processo de aglomeração de mistura.

O esquema da figura 3.6 mostra como ocorrem simultaneamente esses dois fenômenos.

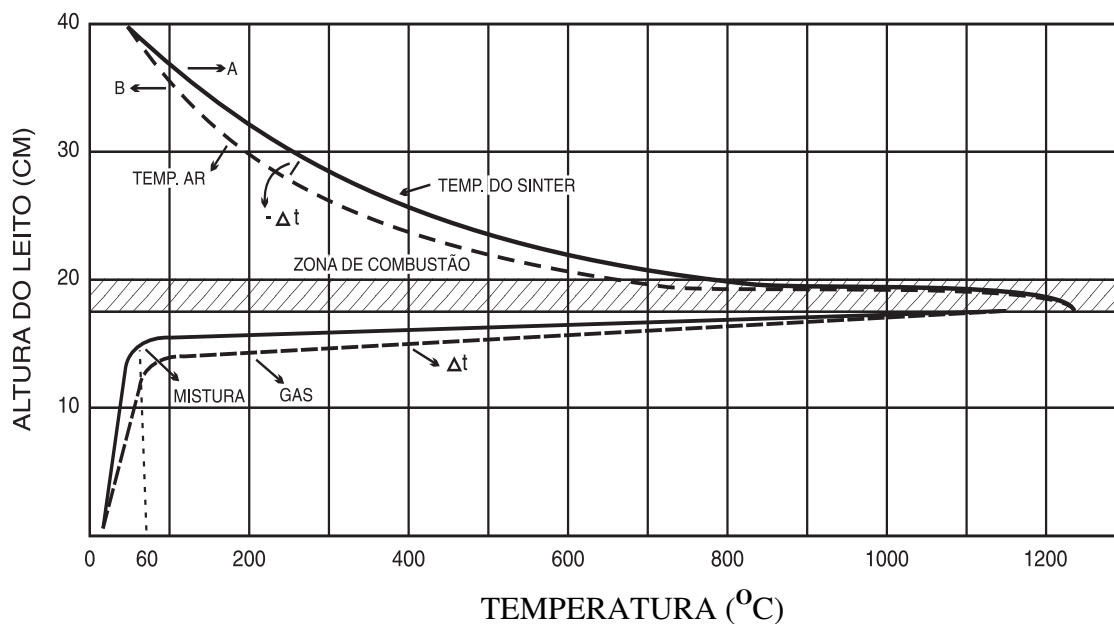


FIGURA 3.6 – Esquema de troca de calor no leito de sinterização, segundo Muniz et alii, citado por Najjar et alii⁽¹⁾

Na região acima da zona de combustão, o ar retira calor do sinter já formado, transportando-o para as regiões inferiores. Na zona de combustão ocorrem quase todas as reações do processo, a uma temperatura superior a 1000⁰C, sendo que o gás e o material sólido trocam entre si as funções de receptor e fornecedor de calor, em curtas frações de segundo e de centímetro. Assim, abaixo da zona de combustão, os gases superaquecidos passam a fornecer calor para a mistura, que se aquece bruscamente da temperatura ambiente até mais de 1200⁰C.

A curva "A" da figura 3.6 mostra que a temperatura, passada violentamente de cerca de 60⁰C para 1200/1400⁰C, desencadeia todas as reações de sinterização.

A curva "B" da mesma figura mostra um deslocamento do perfil térmico do leito, que ocorre ao longo do tempo, observando-se que a cada ponto de "A" corresponde um novo ponto de "B", ou seja, a frente física de propagação de calor se deslocou de "A" para "B", promovendo neste deslocamento um ciclo completo de reações físicas e químicas.

a) Ao se atingir temperaturas próximas de 100°C , inicia-se a evaporação da umidade da mistura, porém como o vapor é carregado para regiões mais frias nas camadas inferiores, ao passar por $60/70^{\circ}\text{C}$ (ponto de orvalho) é novamente condensado. Entre 60 a 100°C aproximadamente, forma-se então uma região em que a umidade da mistura é superior à média, e acima de 100°C inicia-se a zona de secagem.

b) Entre 150 a 200°C , mesmo no curto intervalo de tempo, toda umidade já foi vaporizada, iniciando-se a desidratação dos hidróxidos (150 a 500°C), o que se faz consumindo calor do processo.

c) Quando a mistura atinge a faixa de 500 a 700°C , inicia-se a combustão do coque com violento desprendimento de calor, elevando o nível térmico do ambiente para $1200/1400^{\circ}\text{C}$.

d) A decomposição dos carbonatos inicia-se em torno de 700°C , com consumo de calor.

e) Na faixa de 900 a 1400°C , que define a zona de combustão, também chamada de zona de sinterização ou de escorificação, ocorrem as reações no estado sólido ou semi-líquido, formando-se o magma do sinter, ou seja, o conjunto de silicatos, cálcio-ferritas, etc., que, após cristalização, juntamente com os óxidos de ferro, primários ou secundários, constituem o sinter.

A reação de combustão do coque na mistura: $n\text{C} + m\text{O}_2 \rightarrow x\text{CO} + y\text{CO}_2 + z\text{O}_2 + \text{calor}$, além de produzir grande quantidade de calor, torna o ambiente ligeiramente redutor, o suficiente para uma redução parcial da hematita e magnetita.

f) Atingida a temperatura máxima do processo, sob atmosfera ligeiramente redutora, inicia-se o resfriamento do sinter sob atmosfera francamente oxidante, pois o único gás acima da zona de combustão é o ar. À temperatura ainda bastante elevada ocorre, então, uma reoxidação da magnetita. A cerca de 900⁰C o ciclo de reações químicas se completa, iniciando-se o resfriamento propriamente dito. O sinter da camada superficial, numa espessura de aproximadamente 2cm, sinterizado diretamente pelo calor das chamas do forno de ignição e resfriado bruscamente pelo ar à temperatura ambiente, quando sai do forno é frágil e por isso denominado *soft sinter*.

As figuras 3.7 e 3.8 mostram, respectivamente, um corte longitudinal e transversal de um leito de sinterização.

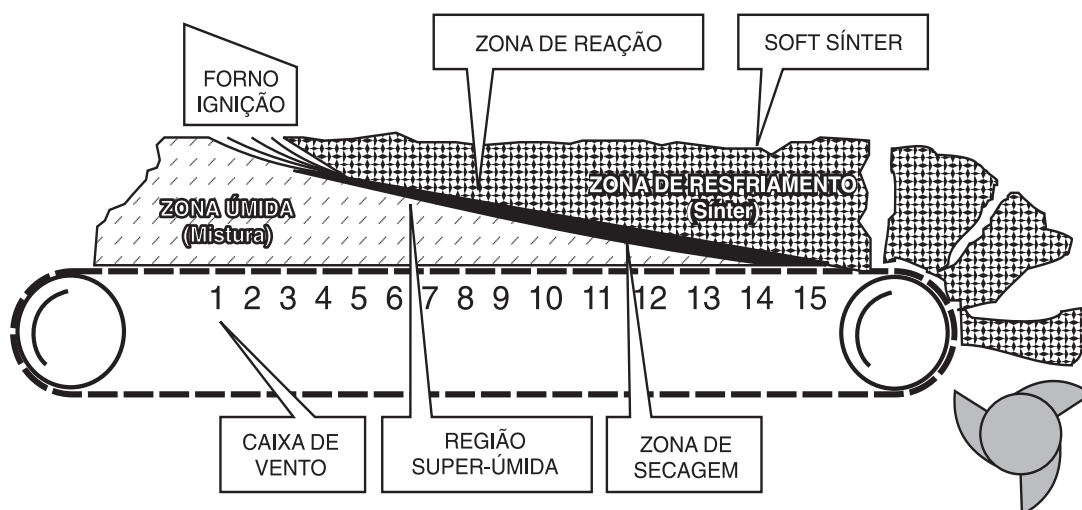


FIGURA 3.7 – Corte longitudinal de um leito de sinterização em um instante qualquer, segundo Najjar et alii⁽¹⁾

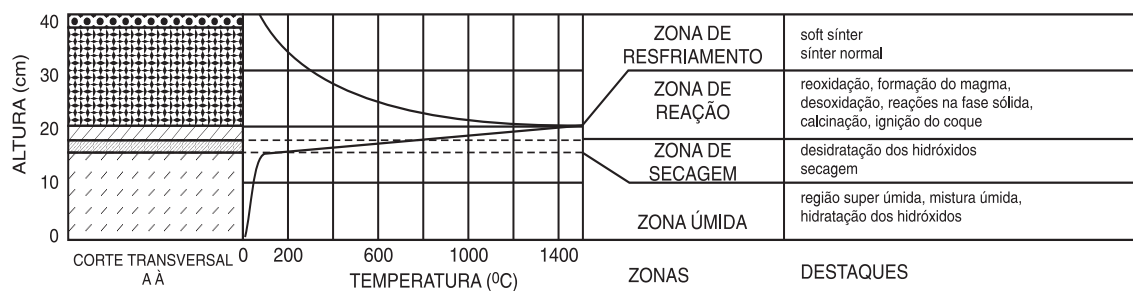


FIGURA 3.8 – Corte transversal e perfil térmico de um leito de sinterização em um instante qualquer, segundo Leite et alii, citado por Najjar et alii⁽¹⁾

Desta forma, pode-se dividir o processo de sinterização nas seguintes zonas principais:

- ◆ **ZONA ÚMIDA:** tendo como limite superior a temperatura de 100°C , constitui a base do leito de mistura a sinterizar.
- ◆ **ZONA DE SECAGEM:** compreendia entre 100 a 500°C . Região onde ocorre principalmente a vaporização da umidade da mistura e depois a desidratação dos hidróxidos.
- ◆ **ZONA DE REAÇÃO:** compreende toda a região térmica no aquecimento acima de 500°C , quando se inicia a combustão do coque, passando pelo ponto de temperatura máxima do processo e chegando até 900°C , quando se inicia o resfriamento do sínter. As principais reações que ocorrem nesta zona são: combustão do coque (exotérmica), decomposição dos carbonatos (endotérmica), reações na fase sólida, reações na fase líquida (formação do magma), redução e reoxidação dos óxidos de ferro.
- ◆ **ZONA DE RESFRIAMENTO:** tem início abaixo de 900°C , quando termina a reação. Nesta fase do processo tem lugar o resfriamento do sínter e é nela que aparecem os primeiros cristais que, conforme o seu desenvolvimento, irão conferir determinadas propriedades ao sínter.

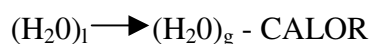
3.1.4. Reações de Sinterização e formação dos constituintes mineralógicos do sínter⁽¹⁾

Reações de Zona Úmida: A hidratação da cal é a única reação química que ocorre durante esta fase. Atinge intensidade máxima dentro do misturador rotativo quando é adicionado um certo teor de umidade para controle do processo. Ao sair do misturador, a mistura, à qual se fez integrar os finos de retorno quente, está a uma temperatura de cerca de 70°C .

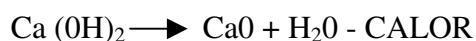


Reações na Zona de Secagem: Nesta zona ocorrem duas reações, ambas consumindo calor e contribuindo para o abaixamento do nível térmico do ambiente gás/mistura. São elas:

◆ Vaporização da umidade:



◆ Desidratação do hidróxido de cálcio:



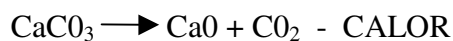
Reações na Zona de Reação:

A) **COMBUSTÃO DO COQUE:** esta reação ocorre a partir de 500°C , elevando a temperatura até perto de 1400°C , formando CO e CO_2 que, segundo alguns autores, está na proporção de 1:2 e conforme outros de 1:4. Devido ao grande volume de ar que atravessa a mistura para queimar o coque, a sua combustão se faz com excesso de O_2 .

Estequiometricamente passam-se as seguintes reações:



B) **DECOMPOSIÇÃO DE CARBONATOS:** o carbonato mais usado na sinterização é o calcário, que inicia sua decomposição a partir de 800°C , absorvendo calor e baixando a temperatura dos gases.



Na realidade, a decomposição do CaCO_3 se inicia lentamente a cerca de 600°C , tornando-se violenta a partir de 800 ou 900°C , com forte absorção de calor. O CaO liberado na reação, em contato com óxidos de ferro presentes, tende a formar cálcio-ferritas (ferritos de cálcio) ainda no estado sólido.

A decomposição do calcário, ou de outro carbonato qualquer, é função da granulometria em que se apresenta. Partículas grosseiras não têm tempo suficiente para decomposição total durante a fase de aquecimento; a periferia destas partículas se decompõe e reage, mas o interior não é calcinado, sendo-o talvez apenas na fase de resfriamento (até 800°C). Quando isto ocorre o CaO formado não tem tempo e muito menos temperatura para reagir quimicamente, permanecendo por isso inalterado no bolo do sínter, sendo uma das causas da fragilização do sínter.

C) REAÇÕES NA FASE SÓLIDA: durante o aquecimento da mistura na máquina de sinterizar, o contato entre as partículas de óxido de ferro, CaO , SiO_2 e outros, favorece o desenvolvimento de algumas reações no estado sólido. São reações que ocorrem por substituição e não por combinação, que é comum quando se trata de líquido ou gás.

Obs: Cumpre ressaltar que no estado sólido a mobilidade dos reagentes é quase nula e a intensidade de contatos entre eles passa a ser o fator mais importante para a ocorrência de reações; mais importante mesmo que a afinidade química.

Tratamento mecânico do sínter:

Após processamento na esteira, o sínter passa por um processo de adequação granulométrica que consiste na britagem e peneiramento ajustando sua distribuição granulométrica às exigências dos altos-fornos. Normalmente esta distribuição granulométrica situa-se na faixa de 5,0mm a 40,0mm de diâmetro de partículas do sínter, com um tamanho médio aproximado de 20mm. O fluxo operacional para isto e os equipamentos variam conforme as características e disponibilidade de *lay out* das empresas.

3.2. Características do Minério de Ferro para Sinterização⁽²⁾

A produção de sínteres com adequada qualidade física, química e metalúrgica e em elevados níveis de produtividade está diretamente relacionada com a qualidade dos minérios de ferro utilizados na mistura a sinterizar. Estes são quase sempre avaliados através de sua composição química e distribuição granulométrica. A dificuldade de obtenção de um único minério com qualidade adequada, em quantidade suficiente e baixo custo, conduziu à adoção de uma mistura de minérios, onde a um ou mais minérios considerados "base" são adicionados os "corretivos".

A especificação química e granulométrica dos minérios de ferro não é, no entanto, suficiente para garantir a obtenção dos índices de produtividade da sinterização, nem da qualidade dos aglomerados produzidos. Características estruturais, texturais e mineralógicas dos minérios, apesar de extremamente importantes, ainda hoje são pouco exploradas, sendo também pouco consideradas na escolha de minérios para sinterização. Diante desses fatos, a avaliação prévia dos minérios em sinterização piloto cresceu em importância no auxílio à definição da mistura de minérios mais adequada, levando em consideração questões comerciais, estratégicas e de logística.

3.2.1. Características Químicas⁽²⁾

A importância atribuída à composição química do minério de ferro é, naturalmente, variável de um para outro usuário, podendo percorrer uma faixa bastante ampla. Sua definição irá depender do balanço de carga para o alto-forno, tendo-se em vista o nível de participação do sínter na carga metálica, da natureza e do volume de escória produzida na fabricação do gusa e, principalmente, da qualidade do sínter. Entretanto, é ponto pacífico que, especificada a composição química para um dado minério, a sua consistência é primordial para o controle efetivo da qualidade do sínter.

A diversificação das fontes de minérios de ferro para sinterização, a utilização de um eficiente sistema de homogeneização e a existência de área para a estocagem desses minérios em pátios garantem uma maior flexibilidade para o controle da composição

química e, até mesmo, absorvem pequenas variações das suas características físicas e químicas.

As limitações de natureza química para os minérios de ferro, no caso brasileiro, em que há abundância de minérios ricos, com reduzidos teores de enxofre, titânio e álcalis, resumem-se aos teores de alumina, sílica e fósforo.

Os limites de controle para a sílica são estabelecidos a partir do volume de escória previsto para o sinter e da constatação de que menores desvios-padrão de basicidade no sinter são obtidos quando não é necessário ajustar o teor de SiO_2 na mistura através do uso de fundentes específicos. Procura-se também evitar a utilização de minérios onde o SiO_2 esteja concentrado nas frações mais grossas (+ 1mm), uma vez que, neste caso, nem todo ele participará das reações de sinterização, diminuindo o volume "real" de escória e fragilizando o sinter⁽⁴⁾.

A principal restrição do Al_2O_3 na mistura de minérios está associada à sua distribuição nas diversas faixas granulométricas. Resultados industriais mostram que a concentração de Al_2O_3 nas frações mais finas dos minérios (-150#) exerce forte influência negativa no índice de degradação sob redução (RDI) do sinter. A elevação do RDI, quando da introdução de Al_2O_3 através das frações mais finas dos minérios, pode ser explicada pela sua participação mais intensa nas reações de sinterização, dissolvendo-se na rede da hematita secundária e tensionando a sua estrutura⁽⁴⁾. O Al_2O_3 presente nas frações mais grossas praticamente não participa das reações de sinterização. Fato semelhante ocorre com a dissolução do titânio na rede da hematita. O TiO_2 também apresenta o comportamento semelhante do Al_2O_3 quanto à degradação sob redução.

Quanto aos elementos minoritários presentes nos minérios de ferro brasileiros, a principal restrição é o fósforo, cuja eliminação através da escória do alto-forno é praticamente desprezível e limita, sobremaneira, a produção de aços mais nobres.

3.2.2. Características Físicas⁽²⁾

As principais características físicas dos minérios para sinterização são a granulometria, a presença de água combinada e o poder de aglomeração a frio. Outras como densidade, porosidade, forma de grão etc., às quais é atribuída pouca importância devido à falta de informações a respeito e de métodos eficazes de avaliação, influem decisivamente na capacidade de aglomeração a frio da mistura e, portanto, no desenvolvimento do processo.

Distribuição Granulométrica. Inicialmente, quando ainda se trabalhava com um ou dois minérios na mistura a sinterizar, a distribuição granulométrica ideal de um minério de ferro para uso em sinterização era definida pela curva de Astier, a qual estabelece que a granulometria deve ser limitada pelas malhas de 6,35mm e 150mesh (0,105mm), com aproximadamente 50% de material acima de 1mm. A necessidade de se trabalhar com um número maior de minérios na mistura e evoluções técnicas na área de preparação de mistura para sinterização, aliadas a testes em escala piloto e industrial, conduziu à obtenção de uma faixa granulométrica tecnicamente aceitável para a mistura de minérios a sinterizar e, principalmente, compatível com a realidade da mineração. Assim, a distribuição granulométrica do *sinter feed* sugerida por Astier evoluiu para o conceito de distribuição granulométrica de mistura de minérios, representada na figura 3.9 pela porção hachurada^(2,5). Em suma, tem-se:

- ◆ 0% acima de 9,5mm
- ◆ 5% máximo acima de 6,35mm
- ◆ 45 a 60% entre 1 e 6,35mm
- ◆ 10 a 25% máximo abaixo de 150mesh.

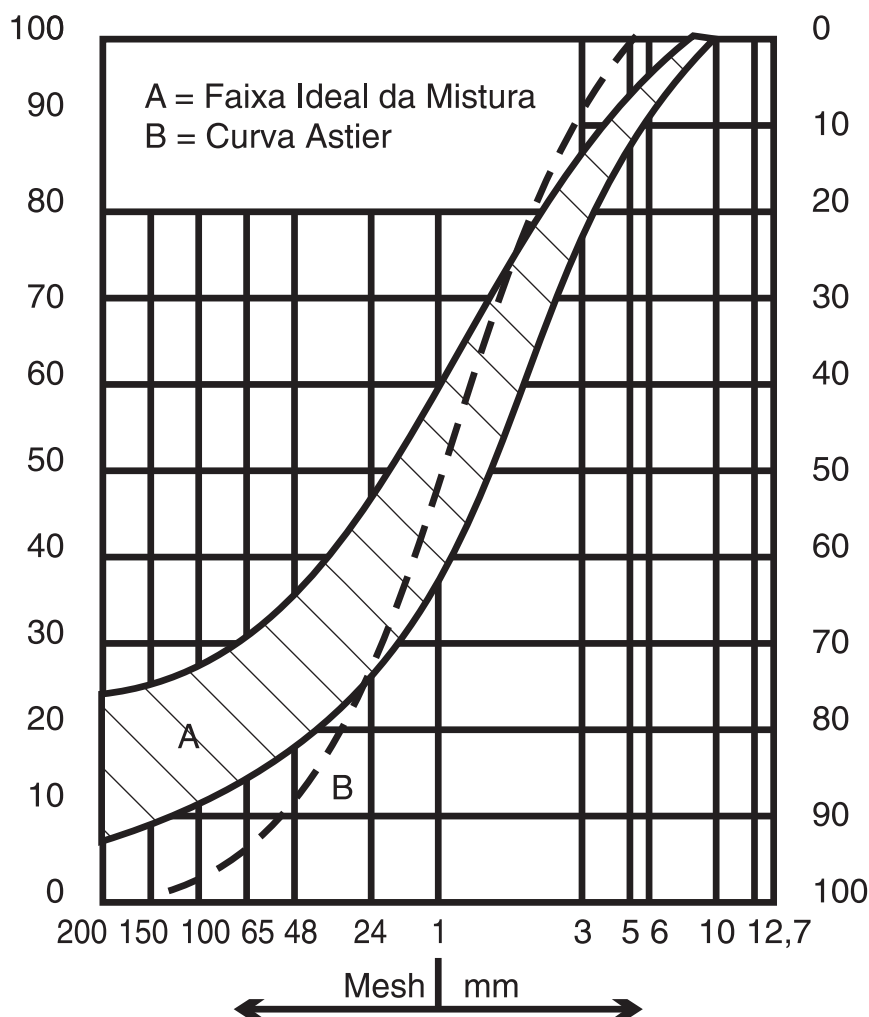


FIGURA 3.9 – Distribuição granulométrica ideal para a mistura de minérios (curva de Astier), segundo Carneiro et alii, citado por Honorato et alii⁽²⁾

Para misturas constituídas basicamente por minérios hematíticos observa-se uma correlação direta entre sua granulometria e a produtividade da sinterização, desde que respeitados os limites de resistência mecânica do sinter⁽⁴⁾. Para minérios hidratados esta correlação não é válida, embora a permeabilidade a frio da mistura seja em geral mais elevada para a mesma granulometria.

Poder de Aglomeração a Frio (p.a.f). Entende-se por poder de aglomeração a frio dos minérios a capacidade que eles têm de formar micro-pelotas ou grânulos quando, providos de certa umidade, são submetidos a uma etapa de misturamento (micro-

pelotização). Esta é uma característica bastante desejável nos minérios por várias razões, entre elas o aumento de produção e a melhor qualidade do produto. A figura 3.10 mostra o aspecto de micro-pelotas em mistura de sinterização embutida a frio em resina.

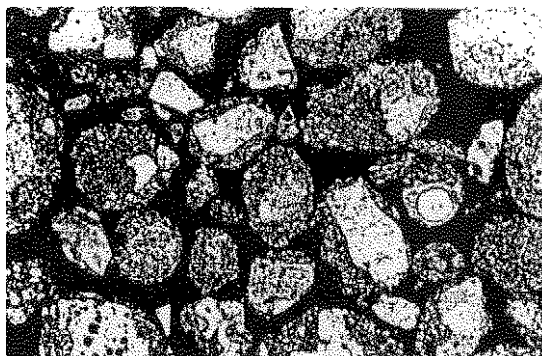


FIGURA 3.10 – Fotomicrografia de micro-pelotas em mistura a sinterizar⁽⁶⁾.

De acordo com estudos realizados sobre o tema, o fenômeno de micro-pelotização é caracterizado pela formação e crescimento de novas partículas devido à adesão das partículas primárias. De fundamental importância para o processo de sinterização, este fenômeno leva à eliminação quase completa das partículas finas, indesejáveis do ponto de vista da permeabilidade do leito, favorecendo a passagem do ar através da camada a ser sinterizada. Estes estudos mostram que existe um conjunto de eventos elementares que contribuem para mudar o número e/ou o tamanho das pelotas. A nucleação, deposição e coalescência são os que predominam no processo de micro-pelotização. A nucleação representa a formação inicial de pelotas, resultantes da interação entre as partículas finas livres. Deposição, por outro lado, ocorre pela interação entre as partículas livres e as pelotas já formadas. Finalmente, coalescência representa o mecanismo de crescimento que ocorre como resultado da interação entre as micro-pelotas.

Alguns autores, estudando o fenômeno de adesão de partículas, identificaram forças de naturezas distintas que contribuem para a atração e união das partículas, tais como: forças de Van Der Waals, potencial eletrostático devido ao contato, excesso de carga eletrostática, atração magnética, pontes líquidas, pressão capilar em poros ocupados por

líquido, agentes ligantes de alta viscosidade, pontes sólidas, ligações por hidrogênio e ligações por estreitamento ou compactação. Entretanto, as mais importantes para a formação e resistência das micro-pelotas são as pontes líquidas e a força da capilaridade⁽²⁾.

Dessa forma, aliada à geometria das partículas das matérias-primas, a água torna-se o principal agente no mecanismo de adesão, apresentando maior força de atração que os demais fenômenos, além de inibi-los.

A água normalmente empregada no processo de micro-pelotização pode ser encontrada em 4 estados do sistema água-partículas, dependendo do seu volume⁽²⁾:

- ◆ ESTADO PENDULAR - quando a água está presente apenas nos pontos de contato das partículas, formando uma ponte líquida. A tensão superficial mantém as partículas unidas;
- ◆ ESTADO FUNICULAR - quando, além das pontes líquidas, alguns poros são totalmente preenchidos por água, havendo ainda a presença de ar em alguns poros;
- ◆ ESTADO CAPILAR - quando todos os poros são ocupados pela água, porém a superfície não é coberta por uma película de água;
- ◆ EXCESSO DE ÁGUA - quando o excesso de água provoca o aparecimento da gota d'água, com partículas no seu interior e também na superfície.

Assim, existe um teor de umidade crítico, comumente chamado de umidade ótima, no qual se obtém uma melhor eficiência de micro-pelotização. O teor de umidade ótimo é aquele no qual um menisco de água é formado em toda superfície dos poros existentes. Ainda com relação ao p.a.f., o mesmo pode ser associado ao índice de granulação durante o misturamento, o qual varia de acordo com o tipo de material, conforme é mostrado na figura 3.11.

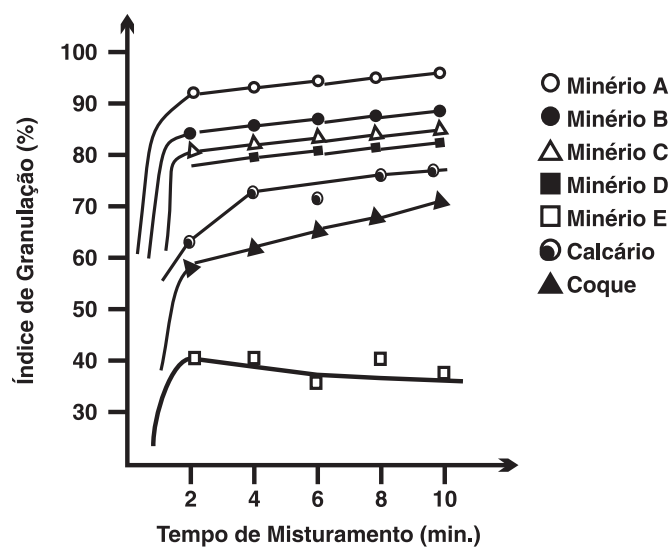


FIGURA 3.11 – Poder de aglomeração a frio de materiais diversos em função do tempo de misturamento, segundo Sugawara et alii, citado por Honorato et alii⁽²⁾.

Observa-se pela figura 3.11, que o minério A apresenta alto poder de aglomeração a frio num período curto de misturamento. Já com o minério E este índice é bem inferior e além disto ocorre uma piora com o tempo de misturamento. Acredita-se que as micro-pelotas formadas inicialmente se desintegram à medida que este tempo aumenta. O calcário e o coque possuem um p.a.f. médio e sofrem uma influência marcante com o tempo de misturamento.

Uma associação de minérios envolvendo partículas nucleantes de um com as aderentes de outro foi feita e a figura 3.12, mostra o comportamento final destas misturas.

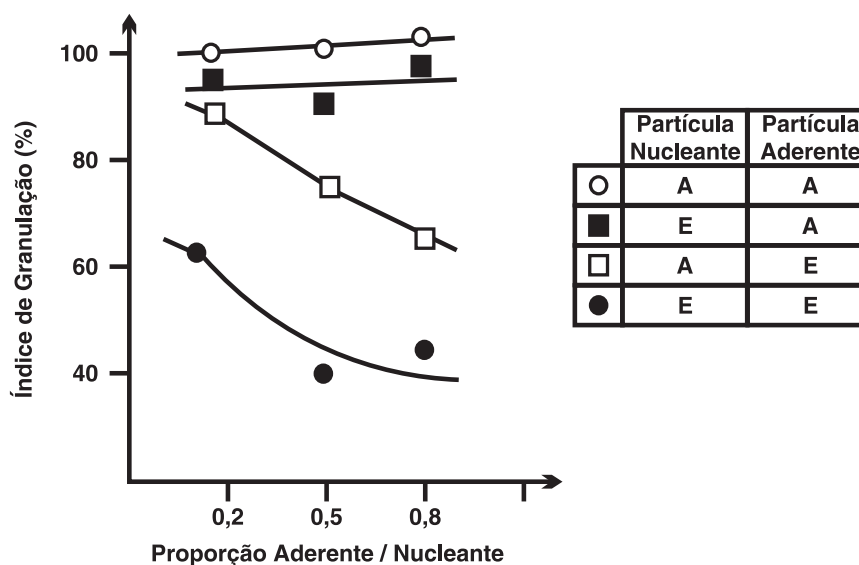


FIGURA 3.12 – Combinação de minérios diferentes em função da proporção aderente/nucleante, segundo Sugawara et alii, citado por Honorato et alii⁽²⁾

Analisando a figura 3.12, verifica-se que o minério **A** mantém o índice de granulação, mesmo com o aumento da quantidade de partículas aderentes. Presume-se que este excesso de finos aglomeram-se entre si formando também micro-partículas. Por outro lado, com o minério **E** ocorre o contrário, ou seja, uma piora do índice de granulação. Quando ocorre a combinação nota-se um melhor comportamento da mistura portadora de partículas aderentes ao minério **A**, comparativamente à mistura contendo partículas aderentes do minério **E**.

A inexistência de um ensaio padronizado para a determinação do "p. a. f." dos minérios de ferro tem dificultado sua avaliação e classificação. Entretanto, o seu conceito tem sido aperfeiçoado e, desta forma, algumas metodologias foram desenvolvidas para a sua determinação indireta, através da avaliação da capacidade de aglomeração de misturas de sinterização⁽⁶⁾.

De acordo com Ishikawa⁽⁷⁾, a formação das micro-pelotas está relacionada com a granulometria dos minérios que compõem a mistura. As partículas maiores que 0,7mm

constituem os núcleos (nucleantes) e as menores que 0,2mm, na presença de umidade, são aderidas a esses núcleos (aderentes). A fração intermediária tende a não aglomerar, pelo fato de não comportar-se nem como núcleo nem como aderente, prejudicando a permeabilidade da mistura.

Segundo Roller⁽⁸⁾, o compromisso entre nucleantes e aderentes não é suficiente para que uma mistura apresente uma boa permeabilidade. Outros fatores, talvez mais importantes, devem ser considerados, tais como rugosidade, forma e porosidade das partículas e a natureza da ganga do minério.

Araujo⁽⁹⁾, Nogueira⁽¹⁰⁾ e Caporali⁽¹¹⁾, aprofundam na classificação de Roller⁽⁸⁾ e Ishikawa⁽⁷⁾ e em síntese resumem que mistura a sinterizar deve conter a menor quantidade possível de partículas intermediárias e uma relação nucleantes/aderentes adequada de modo a propiciar uma boa permeabilidade de carga durante o processo de sinterização.

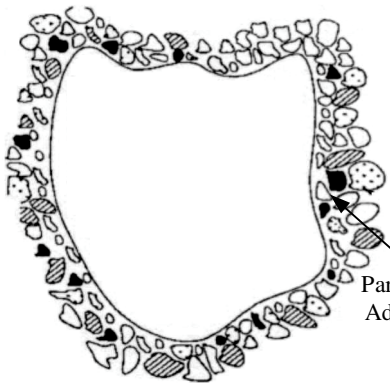
Rosière^(12,13) associa as características geológicas dos minérios, buscando uma caracterização em termos de trama, textura e fatores tipológicos, das principais jazidas de minérios de ferro do quadrilátero ferrífero.

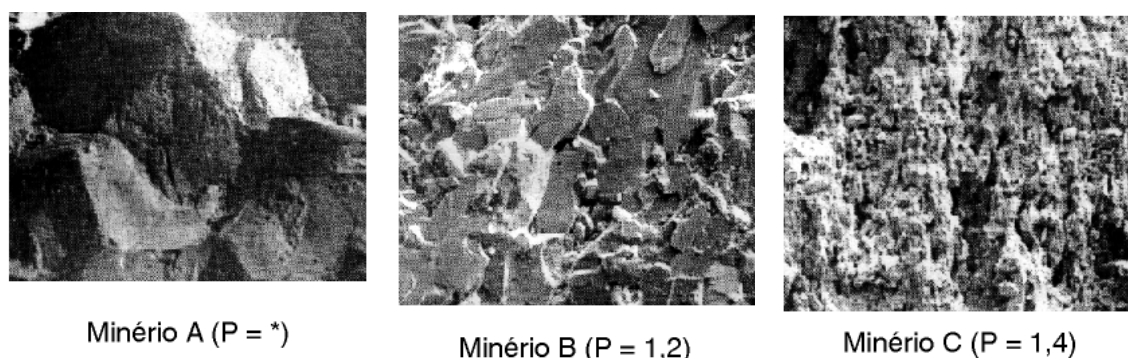
Os minérios brasileiros são praticamente todos do tipo hematítico e podem ser divididos em diferentes categorias tipológicas apresentadas na Tabela 1 (Rosière⁽¹³⁾; Vieira⁽¹⁴⁾). Em sua maioria são anidros e possuem alto teor de ferro e, quando comparados com os minérios australianos, apresentam baixo teor de alumina. Os valores de perda ao fogo e de Fe^{2+} são geralmente baixos (Caporali⁽¹¹⁾). Diferentes tipos de cristais de hematita (especular, martita, granular, microgranular, etc), com tamanhos de cristais variando de 1µm até 1000µm, são encontrados nos tipos de *sinter feed* existentes. Além disso, existem diferentes tipos de trama dos cristais, tais como granoblástica, lepidoblástica, granolepidoblástica, etc. (Rosière^(12 e 13)). Ademais, os minérios podem conter diferentes constituintes mineralógicos acessórios, tais como quartzo, caulinita, gibbsita, etc, contendo, ainda, diferentes valores de porosidades e de diâmetro dos poros (micro,

meso e macro), que têm forte influência nas etapas de aglomeração a frio e a quente de finos de minérios de ferro.

Estudos realizados na USIMINAS com minérios isolados mostraram que existe boa associação entre sua textura e o nível de produtividade da sinterização. A figura 3.13 mostra texturas típicas de alguns minérios hematíticos e suas respectivas produtividades para uma mesma granulometria (testes piloto). Constata-se que a produtividade será tanto mais elevada quanto menor for o tamanho de grão e/ou mais rugosa a superfície.

Tabela III.1 – Descrição geral dos tipos e das características intrínsecas de partículas do *sinter feed* de minérios de ferro brasileiros e da estrutura ideal do microaglomerado produzido na etapa de aglomeração a frio (Ishikawa et alii, 1982; Araújo Filho et alii, 1986; Rosière, 1996; Vieira, 1999).

Partículas do <i>sinter feed</i>		Estrutura ideal do microaglomerado (a frio)
6,3 mm	Supergrossas Não apresentam a capacidade de aderir as partículas mais finas ao seu redor e não contribuem para o fenômeno de microaglomeração a frio. Devem ser minimizadas na composição da mistura a sinterizar.	 <p>Partículas Aderente</p>
	<p>Nucleantes 2</p> <p>Nucleantes Apresentam a capacidade de aderir as partículas mais finas ao seu redor e constituem-se nos núcleos dos aglomerados. São partículas policristalinas anidras ou hidratadas e não devem participar efetivamente no fenômeno de formação de líquido durante a queima. Deve-se controlar a quantidade de partículas nucleantes goethíticas (altos valores de PPC e de P) de modo a evitar a alta contração e formação de grandes trincas no bolo de sinterização e aumento do teor de fósforo no sinter e no gusa.</p>	
3,0 mm	<p>Nucleantes 1</p> <p>São os nucleantes ideais, pois são mais efetivos com relação a capacidade de formar a camada aderente.</p> <p>Podem apresentar diferentes tipos de tramas, constituintes mineralógicos, tamanhos de cristais, grau de porosidade e tipos de superfícies. Essas características influenciam os parâmetros de redutibilidade, degradação durante redução e de amolecimento e fusão do sinter. Não devem conter sílica oclusa na sua estrutura ou mesmo na forma liberada.</p>	<p>Tramas das Partículas Nucleantes Granoblástica: Cristais xenomorfos de hematita complexamente intercrescidos (Ex. Minas de Mutuca, C. Feijão, Carajás, etc.) Lepidoblástica: Cristais orientados de hematita ao longo do plano basal (Ex. Minas de Andrade, Cauê, Morro Agudo, etc.) Mosaico: Cristais de bordas retas sem orientação preferencial. (Ex. Minas de Casa de Pedra, Cauê, Andrade, etc.) Microgranular: Hematita microcristalina disposta em uma trama granoblástica (Ex. Minas de Carajás e Corumbá). Treliça: Cristais alongados sem orientação preferencial (Ex. Minas de Carajás).</p>
1,0 mm ou 0,7 mm	<p>Intermediárias</p> <p>Essas partículas não se comportam nem como nucleantes e nem como aderentes. Devem ser minimizadas na composição da mistura a sinterizar.</p>	<p>Tipologia das Partículas Aderentes e Nucleantes: Espeularísticas (Ex. Minas de Cauê, Andrade, etc.). Martíticas (Ex. Minas da Mutuca, C. Feijão, etc.). Granulares (Ex. Mina do Pico, etc.). Microgranulares (Ex. Mina de Carajás). Magnetíticas (Ex. Mina de C. Feijão, etc.). Goethíticas (Ex. Minas de Alegria, Capanema, etc.).</p>
0,3 mm ou 0,2 mm	<p>Aderentes</p> <p>São partículas que formam a camada aderente ao redor do núcleo no microaglomerado. Podem apresentar diferentes características mineralógicas de modo a influenciar fortemente os fenômenos de aglomeração a frio e de formação da fase líquida durante a queima e na qualidade intrínseca do sinter formado.</p>	
0,105 mm	<p>Superfinas</p> <p>São partículas de <i>pellet feed</i>. Sua participação no <i>sinter feed</i> deve ser minimizada. Contribuem fortemente para diminuir permeabilidade do leito a sinterizar. A alumina nessa fração aumenta O RDI (<i>Reduction Degradation Index</i>) do sinter.</p>	



P = Produtividade (t/h.m²); * não sinteriza

FIGURA 3.13 – Texturas típicas de minérios brasileiros hematíticos (MEV - 100X) – Centro de pesquisa da USIMINAS⁽²⁾.

Na Usiminas observou-se que elevações na participação de concentrados de itabirito na mistura de minérios, em contraposição à participação de hematita natural, conduzem a uma perda de produtividade, mesmo mantendo-se constante a granulometria dos minérios de ferro⁽²⁾, como pode ser visto na figura 3.14. Esta perda de produção parece estar associada à forma lamelar dos grãos de concentrado, que dificulta a micro-pelotização.

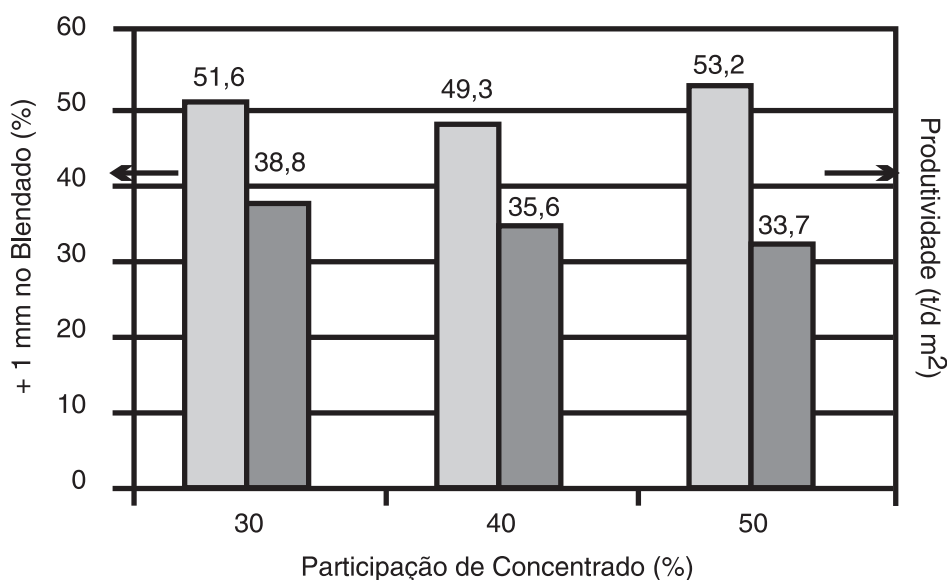


FIGURA 3.14 – Influência de concentrado de minério itabirítico na produtividade da sinterização⁽²⁾.

Grau de Hidratação. O minério hidratado, devido às suas boas características aglomerantes e alta fusibilidade, permite, quando em proporções adequadas, otimizar a produtividade de misturas de minérios hematíticos, reduzir o consumo específico de combustíveis e, em alguns casos, aumentar a redutibilidade do sinter. Sua proporção máxima varia de mistura para mistura, devendo-se também considerar as limitações de fósforo dos processos subsequentes. Sua utilização em proporções muito elevadas pode ocasionar perdas de produção, associadas à grande contração do bolo, acompanhadas de formação de trincas de grande tamanho. Estas trincas favorecem a passagem preferencial de ar, reduzindo a velocidade da frente de combustão e diminuindo o rendimento do produto pela elevação da formação de sinter frágil (*soft sinter*), figura 3.15.

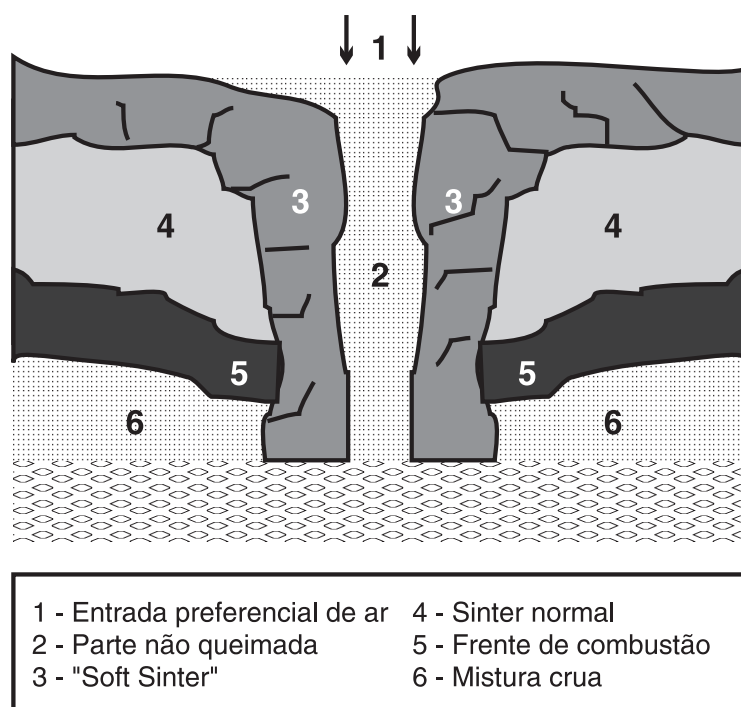


FIGURA 3.15 – Esquema da região afetada por trinca no bolo de *sinter*⁽²⁾.

3.3. Fundentes para Sinterização

Os fundentes têm como função básica escorificar as impurezas introduzidas na carga, pelos minérios e pelo combustível sólido, formando uma matriz de escória capaz de promover a coesão dos grãos dos minérios, de modo a proporcionar ao sínter uma resistência adequada à sua utilização no alto-forno.

Os fundentes são classificados em:

- ◆ BÁSICOS: portadores de CaO e/ou MgO.
- ◆ ÁCIDOS: portadores de SiO₂ e/ou Al₂O₃.

Conforme a ganga dos minérios seja de natureza ácida ou básica, deve-se trabalhar, respectivamente, com fundentes básicos ou ácidos, de maneira a produzir-se um sínter de basicidade compatível com a marcha operacional do alto-forno.

Os principais fundentes usados em sinterização são o calcário, cal, serpentinito, dunito, dolomita e quartzito (areia).

É usual estabelecer-se uma diferenciação entre fundentes e adições. As adições, quando usadas, servem para corrigir alguma característica da mistura ou com vistas ao reaproveitamento de resíduos gerados na operação da usina. Exemplos de adições: carepa de laminação, lixo industrial, pó de alto-forno, escória de alto-forno, minério de manganês etc. Desde que esses materiais, fundentes e adições, devem incorporar-se totalmente ao sínter é imprescindível que apresentem características físicas e químicas que viabilizem sua utilização.

Trabalhos recentes como o de Oyama N. et alii⁽¹⁵⁾ apresentam resultados mostrando a importância da correta adequação granulométrica do principal fundente, o calcário, de tal forma que sua participação na granulação, possa favorecer a uma melhor estrutura do sínter, com ganhos nas propriedades metalúrgicas do produto.

Inclusive neste estudo, os autores sugerem a modificação da forma de dosagem do calcário com o combustível no misturador da sinterização, alterando as características das quase partículas formadas (figuras 3.16 e 3.17).

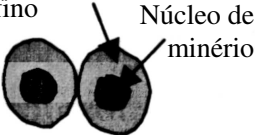
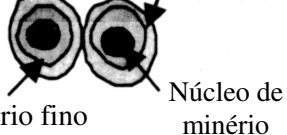
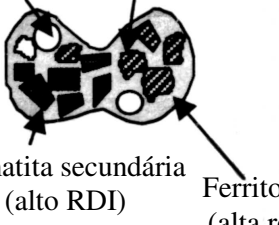
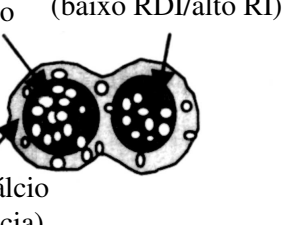
	Método convencional	Novo Método de Granulação
Estrutura da quase partícula	Fino de minério/Calcário/ Coque fino 	Calcário/Coque fino 
Estrutura do Sínter	Micro poro Silicato mineral (baixa resistência) 	Micro poro Hematita primária (baixo RDI/alto RI) 

FIGURA 3.16 – Estrutura da quase partícula e da estrutura do sinter com o novo método de granulação proposto por Oyama et alii⁽¹⁵⁾.

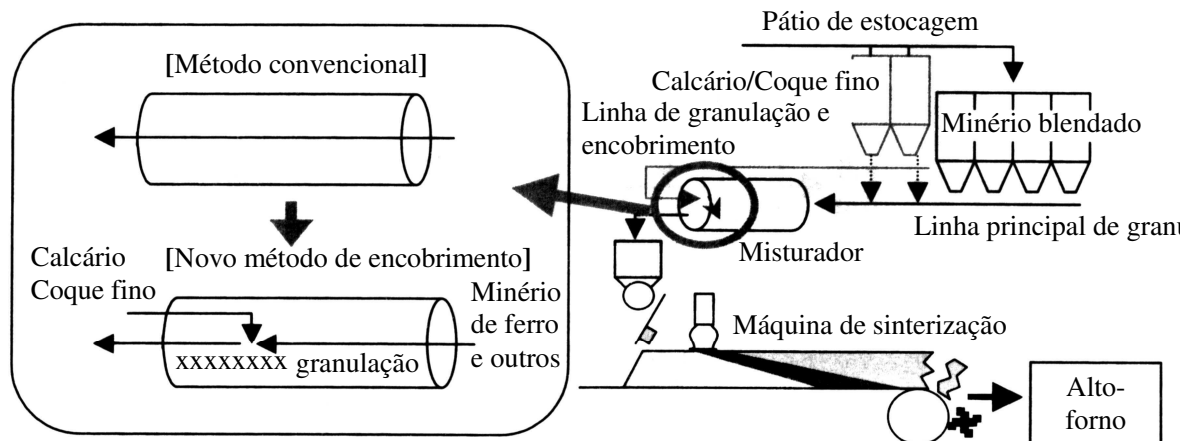


FIGURA 3.17 – Detalhe da modificação de dosagem do calcário e coque fino proposto por Oyama et alii⁽¹⁵⁾

Como fonte de MgO, as sinterizações normalmente utilizam silicatos de magnésio: olivina (dunito) ou serpentinito, a diferença de um para o outro está na forma hidratada que este último silicato apresenta: $Mg_6Si_4(OH)_8$ ⁽¹⁶⁾. Uma outra fonte de MgO bastante

utilizada é a dolomita, que é um carbonato de magnésio, pouco reativo é que demanda altas taxas de energia para a decomposição destes compostos⁽¹⁷⁾.

As propriedades a altas temperaturas dos sínteres são geralmente melhoradas pela elevação de seu teor de MgO. SHIGAKI et al⁽¹⁸⁾ mostrou que o MgO eleva a temperatura de fusão de escórias com elevados teores de FeO. Segundo estes autores, a adição de MgO é menos efetiva para sínteres do que para pelotas, devido as baixas reatividades, na matrix de sínter, dos materiais fonte de MgO (serpentinito e dolomita). Vários registros indicam que o MgO eleva as temperaturas de amolecimento e fusão e minimiza a degradação durante redução (RDI) do sínter⁽¹⁸⁾.

Pimenta et alii^(19, 20, 21), observou a partir da análise das micro estruturas, que uma grande quantidade de partículas de serpentinito permaneciam não reagidos ou, apenas, parcialmente. O grau de reação do serpentinito foi diretamente dependente do nível térmico atingido na queima.

Entretanto, um comportamento, no mínimo curioso do serpentinito durante a reação foi observado: Constatou-se que o serpentinito se decompõe e reage, gerando silicato de cálcio. O MgO resultante da decomposição irá reagir com os óxidos de ferro presentes na sua vizinhança, formando e estabilizando magnetitas.

No entanto, estes campos de reação do serpentinito apresentam grandes trincas radiais que se iniciam a partir da frente de reação do serpentinito, e trincas que contornam a região afetada pela reação. Estas trincas provavelmente se formam durante a etapa de resfriamento do sínter, causada por uma possível contração gerada na solidificação das fases. Isto justifica a necessidade de um rigoroso controle granulométrico dos constituintes da mistura, estando de acordo com informações da literatura.

3.4. Combustíveis para Sinterização

Combustível é um material que se queima sob condições próprias, em contato com o ar, gerando calor.

Na sinterização, usualmente, dois combustíveis são usados com finalidades distintas:

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

O combustível sólido faz parte da mistura de sinterização e, além de gerar o calor necessário à aglomeração, tem por finalidade promover uma permeabilidade controlada no seio da mistura, em estado de semi-fusão, deixando vários (poros) à medida que se queima⁽²²⁾.

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

Nas usinas que operam com alto-fornos a carvão vegetal, os finos desse combustível são usados nas sinterizações.

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

O coque de petróleo pode e é usado com bons resultados em substituição parcial ao coque ou carvão vegetal, desde que se controle a emissão de SO_x quando da utilização deste combustível sólido.

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

Quanto à sua composição química, o principal fator de controle é o teor de carbono que deve ser máximo. No caso específico do coque fino, antracito e coque de petróleo, o enxofre, deve ser controlado, uma vez que os gases gerados são altamente prejudiciais para os equipamentos de exaustão e para o homem por serem corrosivos e tóxicos.

3.5. Técnicas de Segregação Contínua de Mistura na Esteira

3.5.1. Evolução dos conceitos - Carregamento de mistura em dupla camada

No fim dos anos 70, surgiu no Japão o processo de sinterização em dupla camada, onde a mistura é carregada sobre a esteira em duas camadas distintas (figuras 3.18 e 3.19). A grande vantagem desse processo é a possibilidade do carregamento diferenciado nas duas camadas quanto aos teores de combustíveis e fundentes. Assim, na mistura da camada superior, maiores quantidades desses componentes são adicionados, objetivando elevar o rendimento de síter nessa região. Em contrapartida, reduções nesses componentes são feitas na camada inferior que, durante o processo de sinterização, está submetida a altas temperaturas por um elevado período de tempo. Além de possibilitar uma melhor permeabilidade do leito através da distinção granulométrica entre as duas camadas, ou seja, a primeira camada (inferior) com tamanho médio de partículas maior que a segunda camada do leito. Essa prática permitiu a elevação do rendimento do processo, a redução do consumo de combustível sólido e a melhoria das qualidades físicas e metalúrgica do síter produto.

Para o transporte da mistura em duas linhas, foram adaptadas um grupo adicional de silos, outro misturador, outra linha de correias transportadoras e uma outra tremonha de mistura, conforme figuras 3.18 e 3.19.

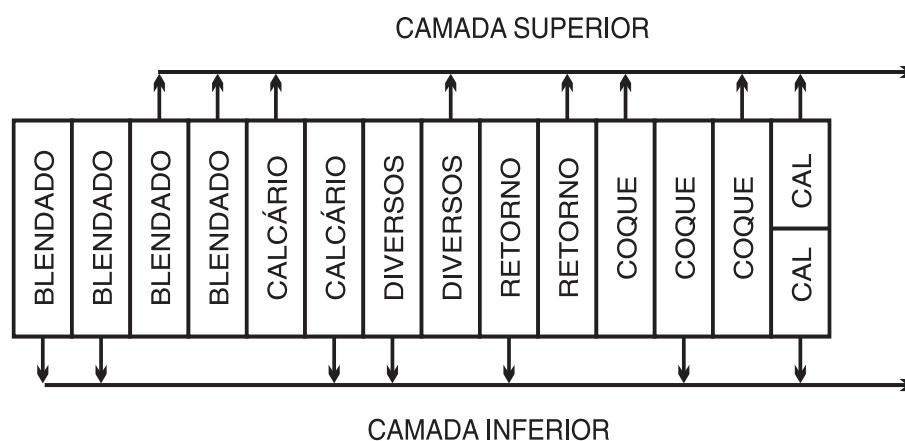


FIGURA 3.18 – Esquema das duas linhas de abastecimento de mistura⁽²⁾.

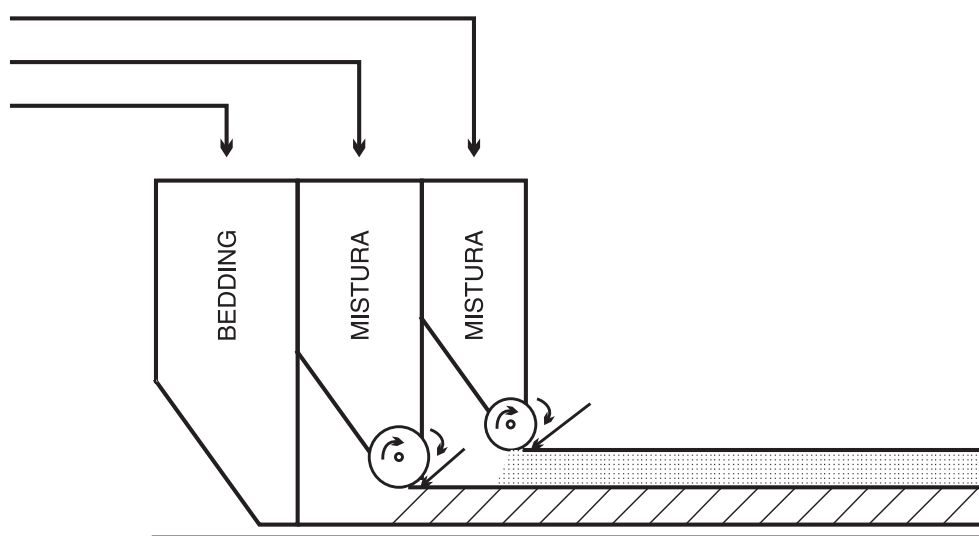


FIGURA 3.19 – Esquema do sistema duplo de abastecimento da esteira⁽²⁾.

Então, é assegurada uma boa permeabilidade do leito, possibilitando uma uniformização das reações de sinterização, desde o topo até o fundo do leito; isto resulta em um sinter de melhor qualidade. Mas, esta técnica tem um custo elevado, pois, necessita de dois sistemas distintos (silos, balanças, correias transportadoras, etc.) para alimentar a esteira

de sinterização. Sendo assim muitos estudos foram iniciados com o objetivo de obter bons resultados operacionais na sinterização, conhecendo as vantagens de possuir duas camadas distintas a sinterizar. Vários trabalhos de Bentes^(23, 24, 25) mostra em escala piloto e industrial, estudos para melhorar a segregação ascendente da mistura do topo até o fundo da grelha a sinterizar, utilizando para isto, o sistema convencional de carregamento (chapa deflectora), variando parâmetros operacionais como umidade, proporção de calcário, retorno de sínter, tamanho das partículas de coque, velocidade do rolo alimentador, bem como a inclinação da chapa deflectora.

3.5.2. Sistema I.S.F (“Intensified Sifting Feeder”)

No final dos anos 80, pesquisadores da N.S.C⁽²⁶⁾, conhecendo as vantagens da melhor distribuição dos constituintes a sinterizar ao longo do leito de uma sinterização, passou a pesquisar uma maneira de simplificar e reduzir custos operacionais, sem perder os ganhos do processo de sinterização contínua com dupla camada.

Na sinterização convencional, o fluxo de mistura cai rapidamente na chapa deflectora e é carregada na esteira sob forma de avalanche. As desvantagens desta operação são:

- ◆ alta densidade;
- ◆ fraca segregação granulométrica ao longo da altura do leito;
- ◆ efeito *sandwich* na estrutura da camada mostrando finos com partículas aglomeradas.

Tudo isto promove a deterioração de permeabilidade da mistura, aumento no consumo de coque com perda de rendimento e produtividade. Como alternativa, a NSC⁽²²⁾ desenvolveu o I.S.F que evita o efeito avalanche, promove maior segregação granulométrica e distribui melhor a densidade da mistura carregada na esteira, em ambos os casos, ao longo da altura da camada com custos relativamente pequenos.

A figura 3.20 mostra a representação da diferença dos dois carregamentos.

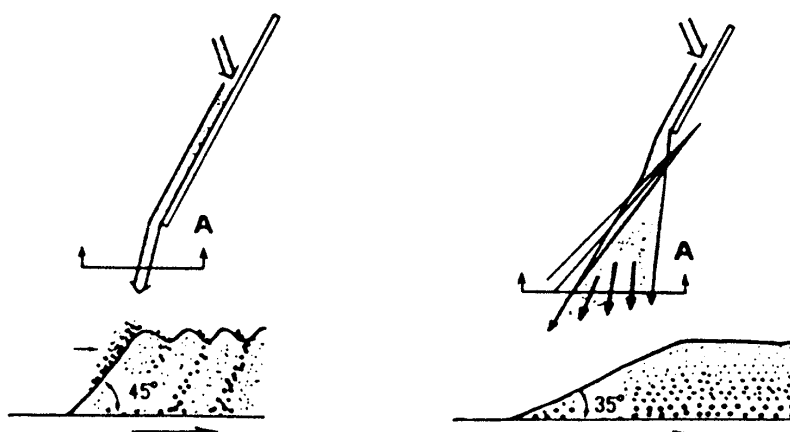


FIGURA 3.20 – Diferença de carregamento: convencional e I.S.F.⁽²⁶⁾

A figura 3.21, apresenta a diferença do perfil granulométrico de uma mistura carregada com o sistema I.S.F e convencional (chute). Como resultado desta segregação, nota-se uma redução da densidade do leito com a utilização do I.S.F como sistema de carregamento na esteira a sinterizar (figura 3.22).

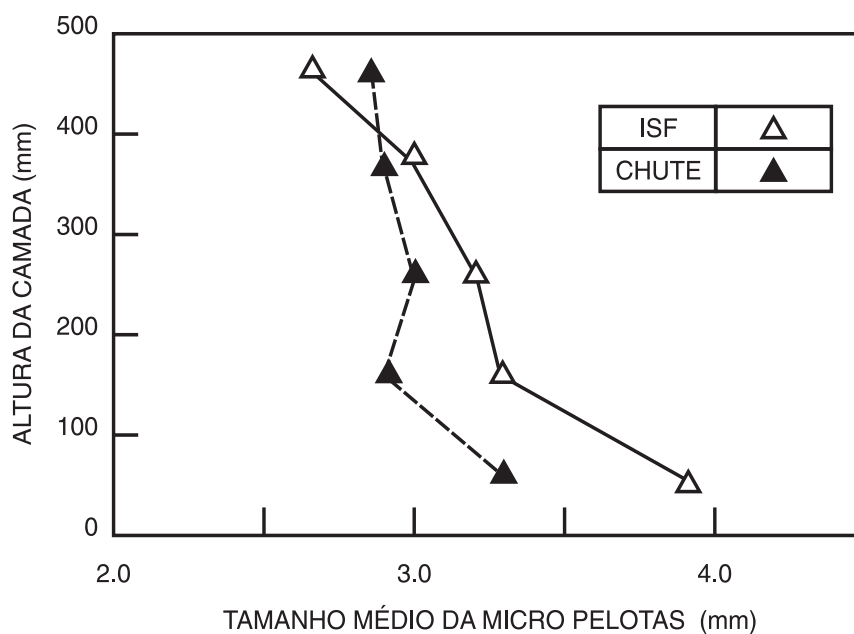


FIGURA 3.21 – Distribuição granulométrica na camada de mistura⁽²⁶⁾.

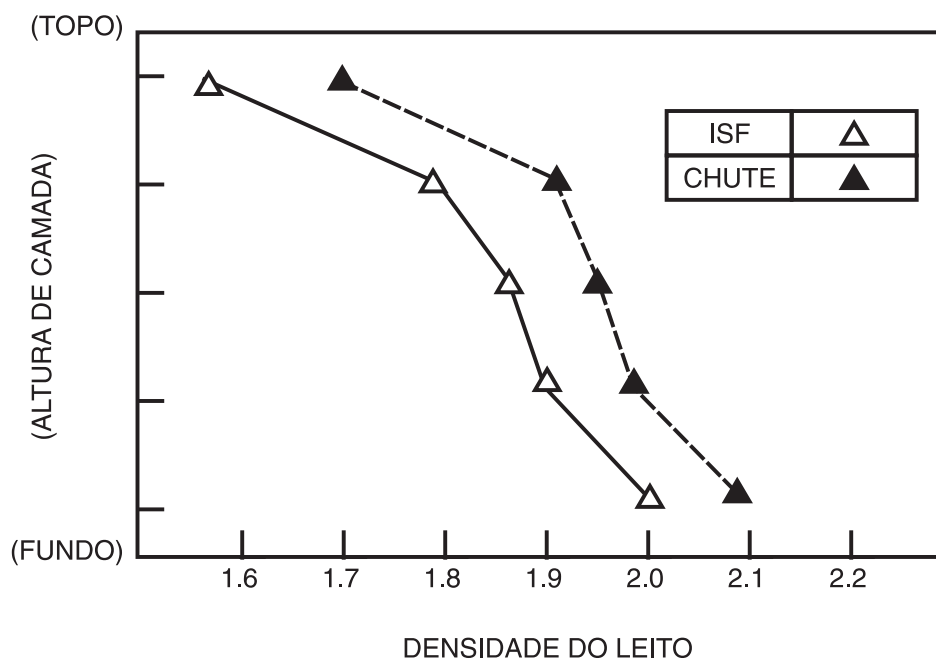
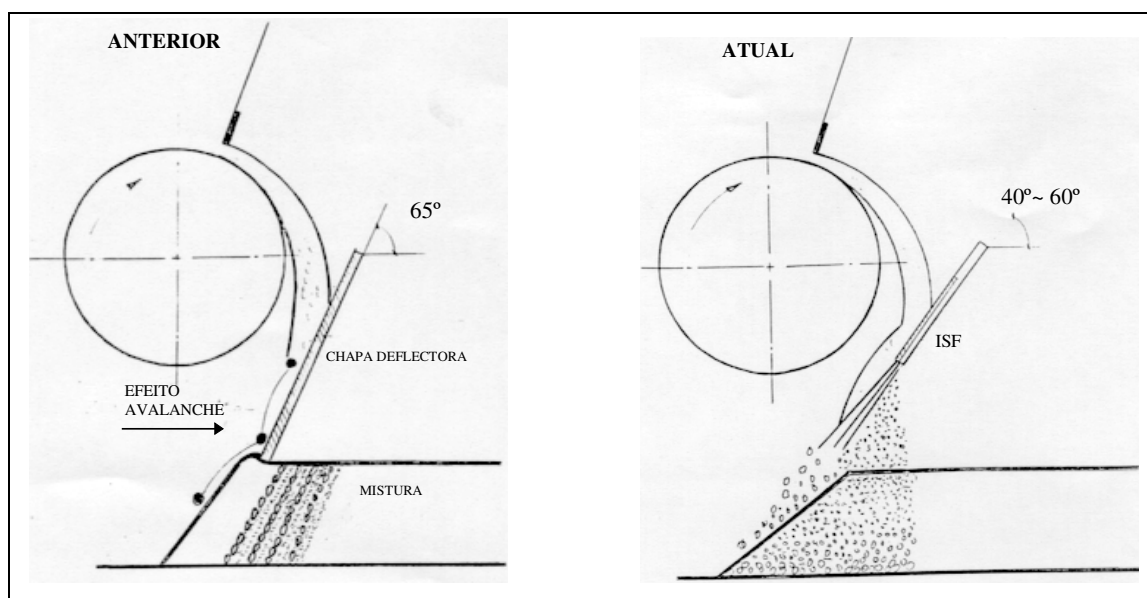


FIGURA 3.22 – Distribuição da densidade na camada de mistura⁽²⁶⁾.

Princípio de Funcionamento do I.S.F⁽²⁷⁾: No sistema convencional de carregamento, constituído por rolo giratório e chapa deflectora, a mistura é alimentada sobre a esteira, num movimento que combina translação e rotação das micro-pelotas, formando o efeito de avalanche, conforme pode ser visto na figura 3.23a. Uma das características do processo de sinterização, neste caso, é a heterogeneidade térmica e de reações ao longo da altura do leito, gerando um sínter frágil na parte superior e muito resistente no fundo.

O I.S.F substitui a chapa deflectora no sistema de carregamento convencional, figura 3.23b. A principal função desse equipamento é a de promover a segregação granulométrica da mistura na esteira, conduzindo as frações granulométricas maiores para a parte inferior da camada e as frações mais finas para a superfície, favorecendo o rendimento do processo com o estabelecimento de um perfil melhor na distribuição de carbono e CaO. A figura 3.24 mostra os aspectos da mistura no leito de sinterização, a partir do carregamento convencional e com I.S.F.



(a) Chapa deflectora

(b) I.S.F

FIGURA 3.23 – Desenho esquemático dos sistemas de carregamento com chapa deflectora e I.S.F.⁽²⁷⁾.

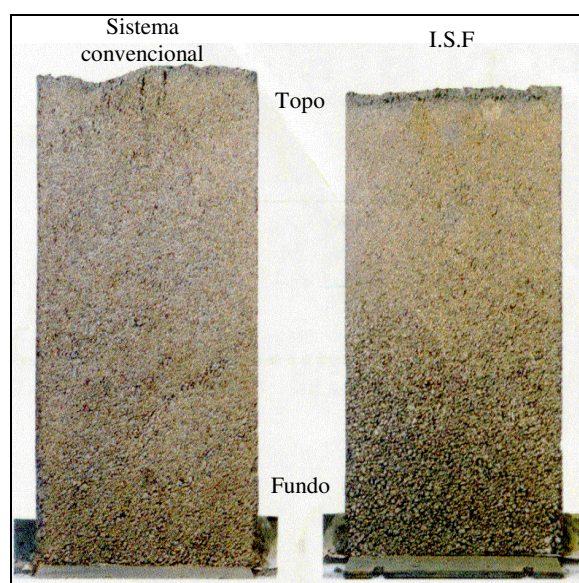


FIGURA 3.24 – Cortes transversais do leito de mistura a sinterizar⁽²⁶⁾.

Como uma parcela significativa de siderúrgicas no Japão e Brasil adotaram o I.S.F, ou equivalente, para aumentar a segregação do leito de suas máquinas de sinterização e, assim, ganhar produtividade e qualidade do sinter, empresas fornecedoras de minério de ferro como C.V.R.D., desenvolveram, em escala piloto, tecnologias e simulações para

possibilitar a seleção de minérios de ferro para tal prática de sinterização. Oliveira et alii⁽²⁸⁾, apresentou em 2003, equipamento piloto (mini segregador, figura 3.25), desenvolvida pela C.V.R.D., baseando-se no princípio de funcionamento do I.S.F.

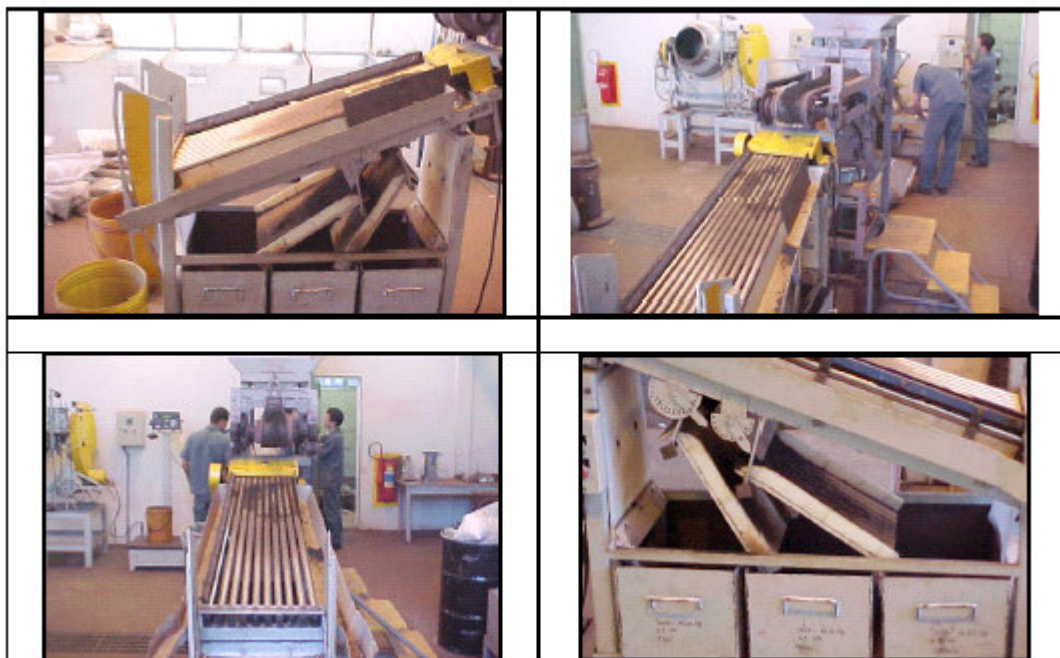


FIGURA 3.25 – Foto do mini segregador de mistura da C.V.R.D.⁽²⁸⁾.

Neste estudo⁽²⁸⁾, são apresentadas as etapas e o fluxograma do procedimento experimental. Todavia comparando os resultados de segregação química e granulométrica com os dados industriais apresentados pela USIMINAS, observou-se que no caso dos ensaios realizados em instalação piloto, o gradiente de segregação se dá de forma mais intensa, tanto em termos granulométricos quanto químicos. O que também ocorreu com o segregador piloto desenvolvido pelo Centro de Pesquisa da USIMINAS. Sendo assim, até então, a melhor maneira de caracterização real e efetiva dos constituintes da mistura é a amostragem industrial com a máquina de sinterização em operação.

4. Metodologia Experimental

O I.S.F da USIMINAS possui 3 módulos de 1 metro de largura, possuindo cada um 3 motores e 56 barras. As barras estão distribuídas em três níveis diferentes e possuem movimentos rotativos em sentidos opostos, cujo objetivo é manter o desgaste uniforme em toda a superfície e evitar o agarramento de material (figura 4.1).

Uma chapa de desgaste, localizada acima do conjunto de barras, tem a função de receber o impacto do material, pois o contato direto nas barras poderia causar perda parcial ou total do I.S.F. Para limpeza desta chapa, existe um raspador que executa movimentos longitudinais em intervalos de tempo pré-determinados.

O conjunto apresenta movimentos no sentido horizontal e diagonal visando, respectivamente, a determinação do ponto de contato do material na chapa e a distância entre as barras e a superfície da mistura. O ângulo de inclinação do conjunto pode variar de 40° a 60° graus, visando obter a melhor eficiência do equipamento em função das características da mistura consumida.

Quanto à chapa alisadora, além de propiciar um acabamento uniforme na superfície da mistura, regula a altura da camada em função do processo, conforme mostrado na figura 4.2.

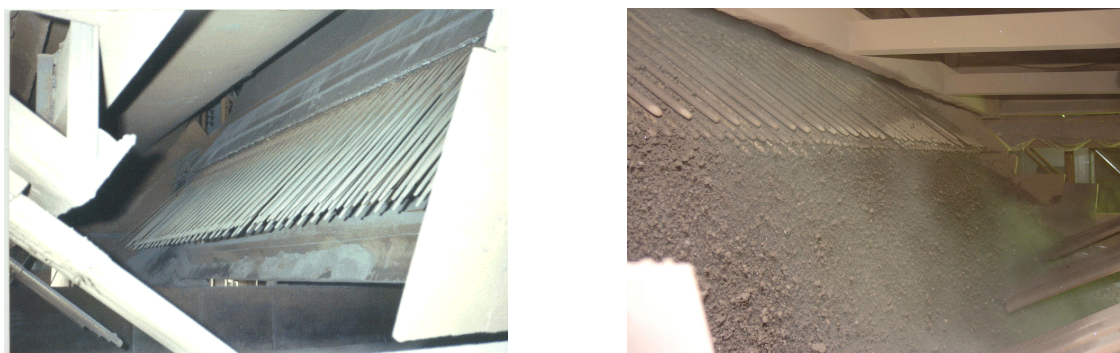


FIGURA 4.1 – Fotos do I.S.F parado e em operação na sinterização nº 3 da USIMINAS.

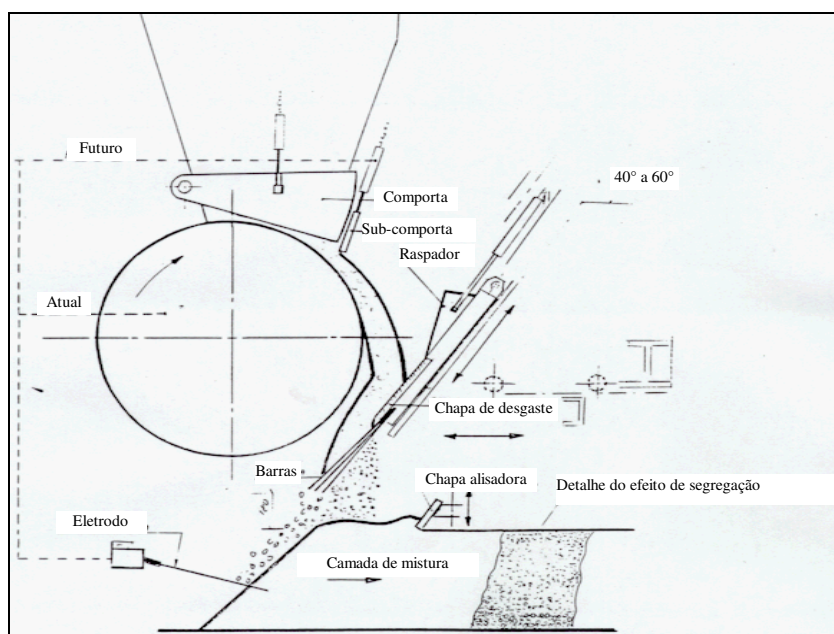


FIGURA 4.2 – Desenho esquemático do sistema de carregamento de mistura com I.S.F.⁽²⁷⁾.

Equipamentos Auxiliares:

Dispositivo para retenção de pedras:

Conjunto de chapas adaptadas sobre a tremonha de mistura, com abertura de aproximadamente 70mm, cuja função é evitar que pedras venham provocar danos às barras do I.S.F.

Conjunto direcionador de mistura no interior da tremonha:

Objetivando direcionar as frações mais grossas do material para a região central da esteira de sinterização, foram instaladas chapas direcionadoras no interior da tremonha de mistura. Este procedimento favorece o fluxo de ar na região central da máquina, melhorando o rendimento de sínter.

Conjunto de eletrodos:

Tem por finalidade controlar a alimentação de mistura na esteira, através da velocidade do rolo alimentador. Devido mudanças no perfil de queda do material na esteira, o comprimento destes eletrodos foram aumentados.

Sistema de alisamento e controle da altura de camada:

Com a instalação do I.S.F uma grande alteração foi necessária no sistema de alisamento e controle da altura de camada da mistura. Antes, a medida da altura de camada exigia a paralisação da máquina e o alisamento era realizado por pequenas chapas horizontais. Hoje, ambas as funções são realizadas pela chapa alisadora (figura 4.2), a qual possui um dispositivo de ajuste e leitura da altura de camada.

Como os ensaios pilotos, até então, não são eficazes na simulação real dos constituintes da mistura e ou do sínter industrial. A USIMINAS desenvolveu metodologias para caracterização do perfil da mistura antes de sinterizar e do sínter diretamente na esteira industrial.

4.1. Metodologia para Caracterização da Mistura Antes de Sinterizar

Para análise da performance da segregação do I.S.F industrial, dando subsídios para decisões de ajustes granulométricos dos constituintes da mistura a sinterizar, a USIMINAS desenvolveu uma metodologia de amostragens de mistura crua na esteira (antes de sinterizar). O método consiste das seguintes etapas e procedimentos:

- ◆ Normalização dos parâmetros de carregamento na esteira: ajuste do nível de tremonha, ajuste da umidade, limpeza das barras do I.S.F, acerto da compactação da mistura;
- ◆ Paralisar a esteira e colocar a operação da mesma em manual;
- ◆ Desligar o forno de ignição deixando apenas os queimadores pilotos acesos, para queima do excesso de gás;
- ◆ Cobrir a região a ser amostrada com folhas refratárias, para durante a passagem sob o forno de ignição, a umidade da mistura seja pouco reduzida (figura 4.3A);
- ◆ Funcionar a esteira em “manual”, passando o material protegido sob o forno de ignição desligado (figura 4.3B);
- ◆ Coleta das amostras: girar o amostrador (parafuso “sem fim”) até o fundo da esteira, enrolar com um plástico, deitar a amostra e separá-la em três regiões: topo, meio e

fundo (figuras 4.3C a 4.3I). Proceder o mesmo para as duas extremidades e para o centro da esteira, identificando-as conforme esquema de identificação de amostra no setor da máquina industrial, apresentada na figura 4.4;

Após este processo, as amostras são acondicionadas, identificadas, sendo submetidas a análises química completa (principalmente SiO_2 , CaO , MgO , Carbono) e determinação do tamanho médio de partículas das misturas granuladas (micro-pelotas).

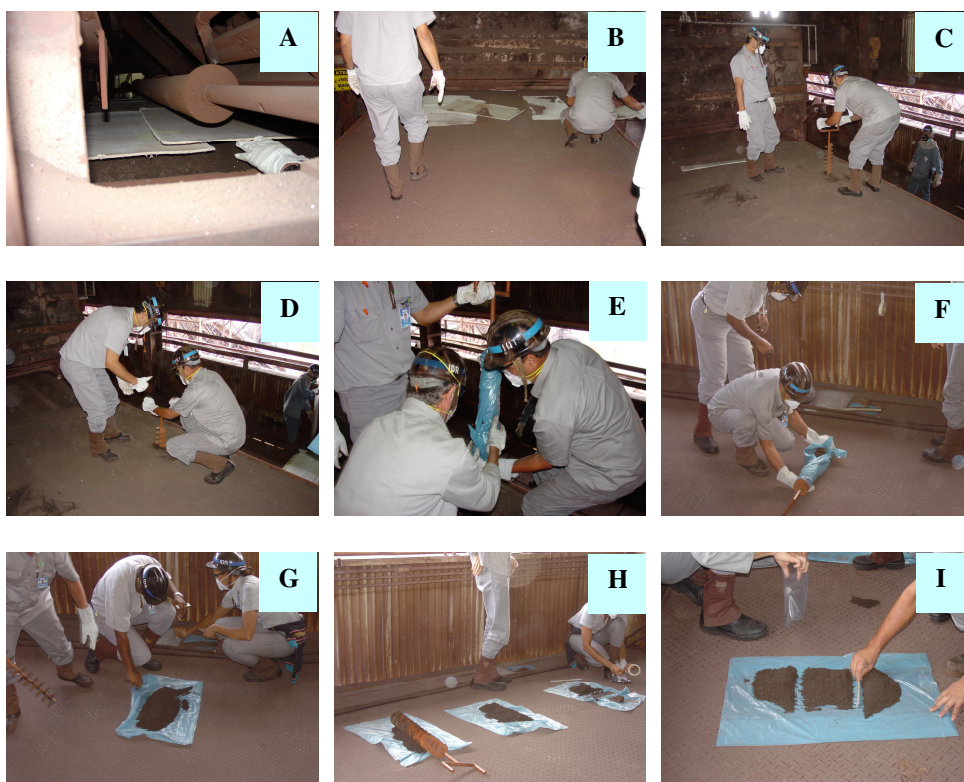


FIGURA 4.3 – Procedimento para retirada da “mistura crua” numa esteira industrial de sinterização

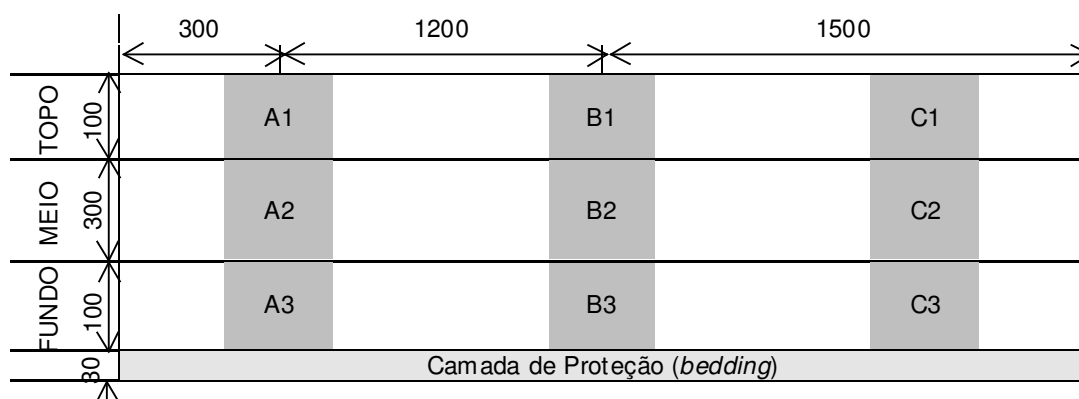


FIGURA 4.4 – Esquema de identificação de amostra de mistura no setor das máquinas de sinterização (unidade: mm).

4.2. Metodologia para Análise do Sínter Diretamente da Esteira Industrial para Caracterização

Para a amostragem do sínter industrial, adota-se o seguinte procedimento:

- ◆ Normalização dos parâmetros de carregamento na esteira: ajuste do nível de tremonha, ajuste da umidade, limpeza das barras do I.S.F, acerto da compactação da mistura;
- ◆ Definir os setores que vão ser retirados para caracterização;
- ◆ Através de um dispositivo de adição d'água desenvolvido na Usiminas, adicionar um volume de água nas fronteiras entre os setores a serem amostrados. Tal procedimento facilita a retirada destes setores na curva final da esteira de sinterização industrial (figura 4.5A);
- ◆ Continuar normalmente o processo de sinterização (figura 4.5B a 4.5E);
- ◆ Quando estes chegarem na curva de descarga da máquina, e, através de uma “ponte rolante”, retirar os dois setores com o sínter já processado (figura 4.5F e 4.5G);
- ◆ Deixar o sínter resfriar no próprio setor por dois dias consecutivos (figura 4.5H);
- ◆ Com o uso de ferramentas apropriadas, retirar as amostras do sínter identificando-as conforme esquema apresentado na figura 4.6.

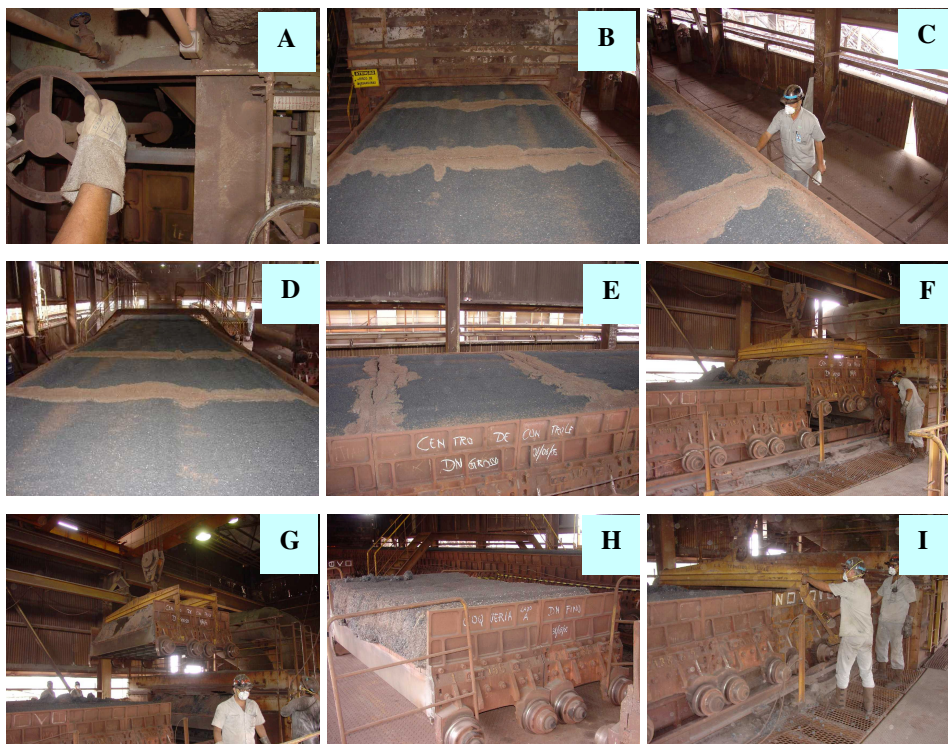


FIGURA 4.5 – Método de amostragem do sínter na esteira durante operação de uma planta industrial

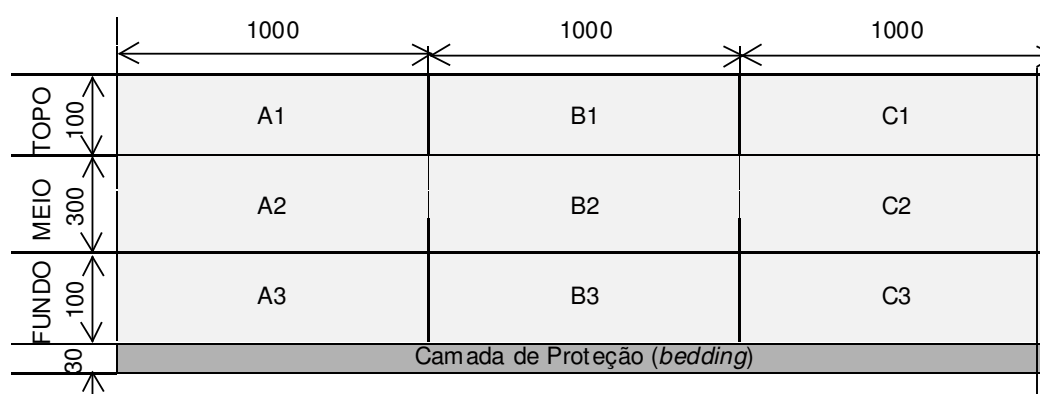


FIGURA 4.6 – Esquema adotado para a identificação das amostras de sínter nas máquinas industriais de sinterização (unidade: mm).

Após esta etapa, cada amostra bruta do sínter é submetida a um processo prévio de degradação granulométrica, para caracterização química, física: *Shatter Test*, *Tumbler Test*, metalúrgica: RI, RDI, amolecimento e fusão e fases cristalinas presentes.

4.3. Caracterização Física e Metalúrgica do Sínter Produzido – Descrição dos Testes

4.3.1. Teste de Choque, *Shatter Test*⁽²⁾

Este teste tem por finalidade medir a maior ou menor susceptibilidade que tem o material de produzir finos, quando submetido às quedas durante o seu abastecimento no alto-forno. Esta degradação prejudica a permeabilidade da carga com uma consequente diminuição da produção.

A descrição do teste encontra-se no Anexo A1

4.3.2. Teste de Tamboramento, *Tumbler Test (T.T)*⁽²⁾

Este teste tem por finalidade medir a resistência do material à abrasão, quando submetido ao atrito com as paredes do forno e à própria carga. Esta degradação prejudica a permeabilidade da carga no alto-forno, diminuindo assim a produção.

A descrição do teste encontra-se no Anexo A2

4.3.3. Índice de Degradação Sob Redução (RDI)⁽²⁾

A degradação durante a redução a baixa temperatura é mais conhecida como RDI (*Reduction Degradation Index*). O índice é definido pela maior ou menor facilidade que tem o material de produzir finos durante a sua redução.

A descrição do teste encontra-se no Anexo A3

4.3.4. Redutibilidade, RI⁽²⁾

Este teste mede a facilidade com a qual o oxigênio da carga metálica é removido sob a ação de um agente redutor.

A redutibilidade é importante para o estabelecimento de critérios comparativos de avaliação do comportamento de carga metálica, podendo suas variações serem associadas ao *coke-rate*, ao grau de redução indireta no alto-forno, à taxa de utilização do gás redutor etc, parâmetros estes ligados ao desenvolvimento das reações de redução na cuba.

A descrição do teste encontra-se no Anexo A4

4.3.5. Ensaio de Amolecimento e Fusão sob Carga – Método Usiminas

O Ensaio de Amolecimento e Fusão sob Carga visa conhecer o comportamento da carga metálica desde os estágios iniciais de aquecimento e redução até sua fusão completa, tendo em vista que a zona coesiva ou zona de amolecimento e fusão é responsável por mais de 60% da perda de carga do gás dentro do alto-forno.

A descrição deste ensaio encontra-se no anexo A5

4.3.6. Microscopia Quantitativa em Fases – Método Usiminas

Quantificar os elementos estruturais presentes em vários tipos de materiais, através de discriminação de cores e tonalidades feitas por unidade de área em um analisador de imagem. Onde, no sinter, são identificados os seguintes constituintes: hematita, magnetita, silicatos, ferritos de cálcio e poros. Esta análise quantitativa, visa correlacionar algumas propriedades físicas e metalúrgicas do sinter com as fases cristalinas determinadas.

Equipamento utilizado: Microscópio Óptico acoplado a um Sistema de Processamento e Análise de Imagens, Quantimet 570C.

4.4. Determinação/Testes com Nova Granulometria do Serpentinito

Dominando as técnicas de amostragem descrita, serão realizadas novas amostragens correlacionando e caracterizando a mistura e o sinter produzido com um serpentinito de granulometria maior. Para inclinação de 45°, foi realizado teste industrial com o serpentinito na faixa granulométrica de 03 a 08mm de diâmetro de partículas. Atualmente a granulometria do serpentinito situa-se na faixa de 0,105mm a 3,0mm. O que deseja-se, neste caso, é direcionar as partículas do serpentinito para o fundo da esteira da máquina, local este, dotado de um aporte térmico maior que na superfície da esteira. O que, possivelmente, obteria um melhor rendimento do “bolo de sinter”, bem como verificar suas propriedades físicas e metalúrgicas.

5. Resultados e Discussão

5.1. Adequação Granulométrica dos Constituintes da Mistura de Sinterização

Com a implantação do sistema I.S.F de segregação de misturas nas máquinas de sinterização da Usiminas, elevações substanciais de permeabilidade do leito foram obtidas, com o conseqüente aumento na vazão e redução da depressão das máquinas de sínter. Isso permitiu, de imediato, a elevação da altura de camada de mistura em mais de 17%, com ganhos de rendimento e redução de combustível.

Os padrões operacionais foram alterados, sendo necessárias várias ações na busca da adequação da operação da planta ao novo sistema de carregamento. Dentre elas, a adequação granulométrica dos constituintes da mistura mostrou-se de fundamental importância para a melhoria dos resultados operacionais.

Avaliações feitas em amostras de mistura “crua” coletadas no leito de sinterização, antes e após a instalação do I.S.F, mostraram a necessidade de ajustes nas granulometrias dos fundentes e combustíveis, uma vez que a distribuição desses materiais ao longo da camada não era adequada.

Assim, uma série de estudos envolvendo as três sinterizações, foram realizadas objetivando dar subsídios a adequação da distribuição granulométrica desses materiais para a operação das plantas de sinterização com I.S.F. O detalhamento de caracterização da mistura das três sinterizações, encontra-se no anexo A6. Mas, como a principal sinterização da usiminas é a planta nº2 (MS2), nesta etapa deste estudo, foram referendados os dados desta máquina.

5.1.1. Avaliação das Eficiências de Segregação Química e Granulométrica de Misturas de Sinterização com o I.S.F a 45°

Inicialmente, avaliações foram feitas para se definir as eficiências de segregação química (C, CaO, MgO etc) e granulométrica das misturas alimentadas nas máquinas de sinterização. Para isso, amostras de mistura “crua” foram coletadas diretamente sobre as esteiras, conforme descrito no capítulo 4 (4.1 – Metodologia para análise da eficiência de segregação do I.S.F).

A determinação do perfil de distribuição do tamanho médio de partículas foi realizada para a avaliação da eficiência de segregação granulométrica do sistema, ao passo que o perfil da distribuição de C, CaO e MgO indica o nível de adequação granulométrica das matérias-primas (combustível e fundentes).

Os resultados dessa avaliação, mostrados na figura 5.1, para o caso da Máquina de Sínter 2 (MS2) com o I.S.F a 45° de inclinação em relação ao plano horizontal, representam valores médios das três amostras coletadas em cada uma das regiões do leito sobre a esteira de sinterização, topo, meio e fundo, antes e após a instalação do equipamento de segregação.

Observa-se a significativa intensificação da segregação granulométrica da mistura promovida pelo I.S.F, com a redução do tamanho médio das partículas da mistura granulada da região superior do leito e a elevação do tamanho médio correspondente à região inferior.

A mesma tendência de intensificação da segregação foi observada para os teores de C, CaO e MgO, confirmando a expectativa de maior quantidade de combustível e fundentes na região superior do leito.

No entanto, esses resultados foram obtidos para as matérias-primas sem nenhum ajuste prévio de granulometria, o que indicavam a existência da possibilidade de melhorias adicionais de rendimento de sínter produto e de produtividade, além das obtidas com a simples implantação do I.S.F.

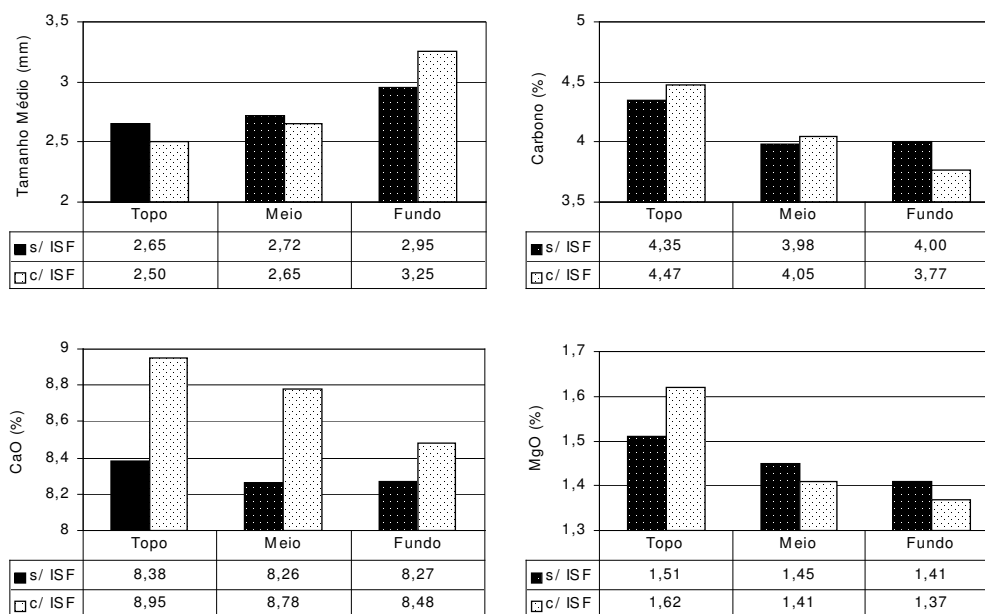


FIGURA 5.1 – Distribuição dos teores de C, CaO e MgO e do tamanho médio de partículas da mistura granulada da MS2, antes e após a instalação do I.S.F.

5.1.2. Adequação da Distribuição Granulométrica de Combustíveis e Fundentes

Nessa etapa, assumiu-se como premissa básica que as distribuições granulométricas mais adequadas para combustíveis e fundentes seriam aquelas que favorecessem a concentração preferencial desses componentes na região superior do leito, permitindo a elevação da resistência física do síter dessa região, com ganhos de rendimento de produto e de produtividade das plantas de sinterização.

Na busca desse ideal, parte das amostras de mistura coletadas sobre as esteiras das máquinas de sinterização, descritas anteriormente, foram submetidas a ensaios de peneiramento a úmido para a determinação da distribuição granulométrica real. Antes, porém, as amostras de mistura, de cada uma das três regiões do leito, foram previamente submetidas a um processo a úmido de desagregação das partículas granuladas, com o auxílio de um agitador mecânico, sendo, em seguida, secadas em estufa e pesadas.

Os resultados da distribuição granulométrica real da mistura da MS2 (figura 5.2) mostram que as partículas retidas nas malhas superiores a 2,0mm apresentam a tendência de deslocarem-se preferencialmente para a região inferior do leito, ao passo que as partículas situadas entre as malhas de 0,149mm e 2,0mm tendem a se concentrar na região superior. Esse comportamento pode ser justificado com base na teoria proposta por alguns pesquisadores, segundo a qual as partículas de minério de ferro concentradas na faixa 0,2mm a 0,7mm não comportam-se nem como partículas nucleantes e nem como partículas aderentes, durante a etapa de granulação, permanecendo liberadas. Assim, considerando-se que as partículas dos combustíveis sólidos e fundentes, nessa faixa granulométrica, tenham comportamento semelhante, permanecerão também liberadas e, portanto, pelo efeito da segregação, serão destinadas à região superior do leito.

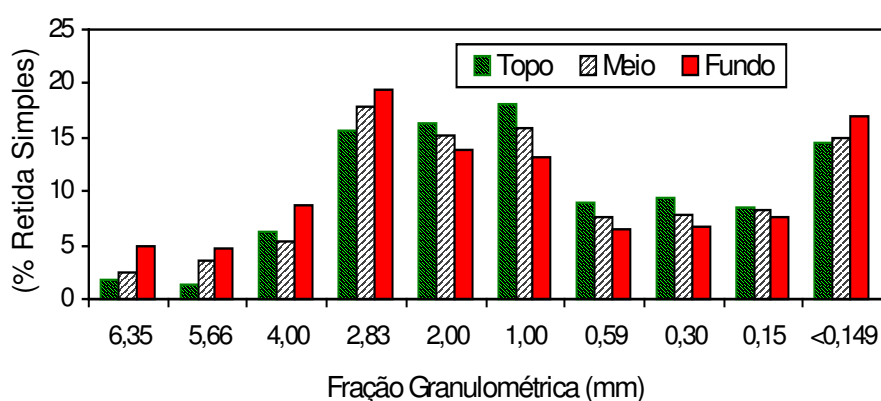


FIGURA 5.2 – Distribuição granulométrica real da mistura da MS2.

De acordo com esse conceito, ajustes foram feitos nas distribuições granulométricas dos combustíveis sólidos e fundentes (tabela V.I), tendo por meta a elevação da participação nas faixas granulométricas intermediárias, ou seja, 0,2mm a 2,0mm. Em alguns casos, isso representou um intenso esforço por parte dos fornecedores, principalmente quando a matéria-prima apresentava-se muito fora dessa especificação. As frações super finas de todos os combustíveis (coque e antracito) e parte dos fundentes (calcário e cal) foram reduzidas.

Quanto aos minérios de ferro, os ajustes visaram a redução da fração super fina e elevação das frações mais grossas, consideradas nucleantes (tabela V.I). Essas

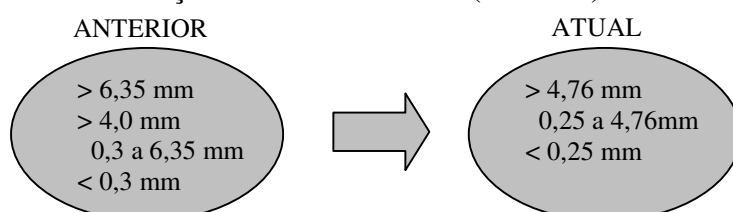
alterações favorecem duplamente o processo, em primeiro lugar, por reduzir a fração de finos que prejudica fortemente a permeabilidade, e em segundo, por favorecer o deslocamento das partículas mais grossas para as regiões inferiores, aumentando, indiretamente, a participação relativa de combustíveis e fundentes nas regiões superiores.

TABELA V.1 – Ajustes da distribuição granulométrica dos combustíveis sólidos, fundentes e minérios tipo *sinter feed*.

AÇÃO NAS MATÉRIAS-PRIMAS:

Ajuste na granulometria do combustível

Mudança de faixa de controle (AGO/97):



Manutenção do ajuste do Combustível Sólido:

Combustível	ANO	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
COQUE	> 4,76mm	2,56	2,76	3,30	2,90	3,24	3,33	3,53
	4,76 a 0,25mm	72,15	74,90	70,09	69,08	68,47	68,74	67,79
	< 0,25mm	25,41	21,22	25,80	27,93	28,27	27,91	28,69
ANTRACITO	> 4,76mm	2,07	1,97	2,02	1,95	2,59	2,67	3,72
	4,76 a 0,25mm	83,86	86,20	84,55	81,58	81,54	82,51	79,97
	<0,25mm	14,10	11,90	13,40	16,45	16,38	14,45	16,30

Engrossamento do Minério de Ferro:

Minério	ANO	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
SECA	> 1mm	55,00	57,00	64,20	65,60	65,19	65,52	66,37
	< 0,105mm	26,60	25,10	19,90	19,60	18,52	17,92	16,77
SMCE	> 1mm	53,90	53,90	54,80	54,10	52,72	55,51	54,39
	< 0,105mm	19,50	20,20	19,70	19,90	19,89	18,84	18,30
G. SOCO	> 1mm	52,80	50,40	58,60	57,30	60,02	58,37	55,62*
	< 0,105mm	18,00	19,40	13,60	15,80	14,76	11,55	12,07

• Dados C.V.R.D.

Engrossamento do Calcário e Cal

	ANO	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
CALCÁRIO (EIMCAL)	> 1mm	54,30	67,50	69,80	70,90	70,48	66,84	66,61
	< 0,105mm	24,40	14,00	13,90	13,00	14,69	18,26	16,33
CAL (ITAÚ)	> 1mm	17,00	-	33,30	41,80	45,26	51,35	59,81
	< 0,105mm	51,70	-	38,20	31,80	36,79	34,26	25,56
CAL (CALC.)	> 1mm	22,20	21,71	23,40	33,40	24,85	28,97	36,62
	< 0,105mm	39,50	35,70	36,60	29,30	32,68	33,88	28,98

5.1.3. Efeito da Adequação Granulométrica das Matérias-Primas sobre a Eficiência de Segregação e Qualidade do Sínter

Inicialmente, amostras de mistura crua foram coletadas sobre as esteiras de sinterização, de acordo com metodologia descrita no capítulo 4, e submetidas a análises químicas e ensaios de determinação do tamanho médio de partículas (figura 5.3)

Em seguida, amostras de sínter foram coletadas diretamente sobre as máquinas de sinterização para avaliação das suas propriedades físicas e metalúrgicas, conforme também descrito no capítulo 4 (4.2 – Metodologia para análise do sínter diretamente na esteira industrial para caracterização).

Após a estabilização, amostras foram retiradas para os ensaios físicos, metalúrgicos e caracterização mineralógica, cujos resultados, para o caso da MS2, e com o I.S.F a 45° são mostrados na figura 5.4. Eles representam valores médios das três amostras, de mistura e sínter, coletadas em cada uma das regiões da camada, topo, meio e fundo. Para efeito de comparação, são apresentados os resultados obtidos antes e após os ajustes realizados nas matérias-primas.

Observa-se, na figura 5.3, que melhorias foram obtidas com relação aos teores de C e CaO da região superior da camada, sem o comprometimento da segregação granulométrica. Ao contrário, o que se observa é a manutenção da segregação e uma ligeira elevação do tamanho médio da mistura em toda extensão da camada, resultante das alterações na granulometria das matérias-primas.

Os aumentos nos teores de C e CaO da região superior foram responsáveis por uma elevação significativa da resistência mecânica do sínter (shatter e tumbler index) dessa mesma região, conforme mostrado na figura 5.4. Entretanto, observa-se uma ligeira queda na resistência mecânica do sínter da região inferior, que pode estar relacionada ao engrossamento dos minérios de ferro e à redução de combustível e do volume de escória nessa região. Ambos os fatores concorrem para a formação de sínter mais frágil e são decorrentes da segregação granulométrica promovida pelo I.S.F.

Portanto, o uso de minérios excessivamente grossos pode levar a fragilização também excessiva do sínter das regiões inferiores, com conseqüências danosas ao rendimento e a produtividade da planta. Esse fato mostra a necessidade de se controlar, dentro de limites bem estabelecidos, a fração mais grossa dos minérios e ou sua segregação no leito a sinterizar.

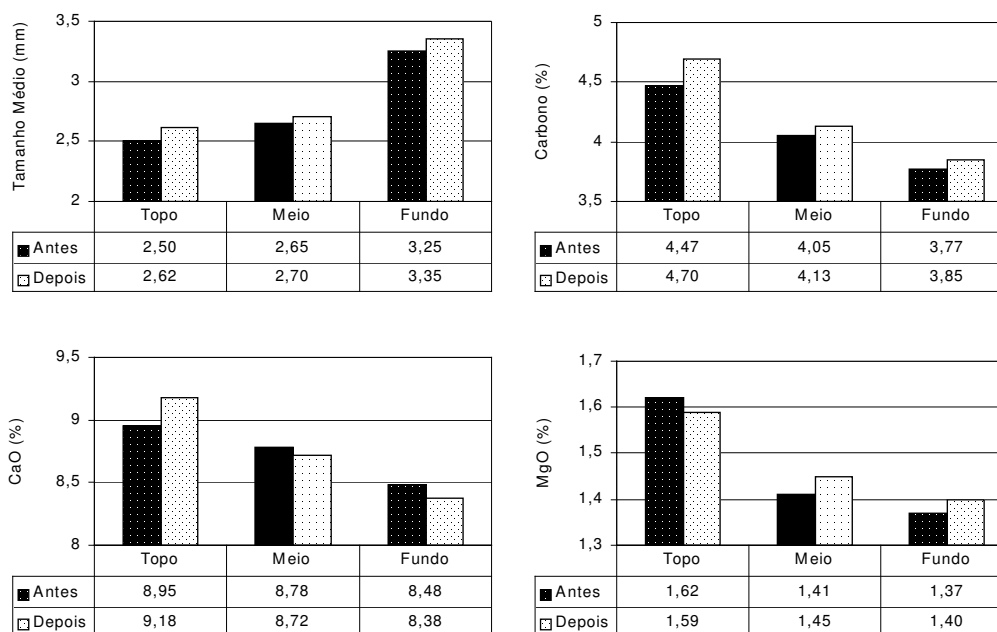


FIGURA 5.3 – Distribuição dos teores de C, CaO e MgO e do tamanho médio de partículas da mistura granulada da MS2, antes e após a adequação das matérias-primas.

Quanto ao teor de MgO, cuja a principal fonte é o serpentinito, para qualquer situação, o nível apresenta-se sempre elevado nas regiões superiores do leito. Local este não muito adequado, devido ao fato da transformação dos silicatos demandarem altas taxas de energias. Para isto, o melhor posicionamento das partículas de serpentinito, seria nas regiões inferiores do leito de sinterização. O que demonstra uma necessidade de engrossamento do mesmo.

Os resultados de RDI e redutibilidade (RI) das amostras de sínter, das diferentes regiões do leito da MS2, apresentam tendências bem distintas (figura 5.4). Enquanto o RDI apresenta uma tendência bem definida de elevação nos sínteres das camadas inferiores, o RI apresenta tendência inversa.

Com relação ao RDI, pode-se afirmar que seu comportamento deve-se a dois aspectos principais:

– maior nível térmico das regiões inferiores, que favorecem a formação de fases secundárias provenientes de precipitação da fase líquida e de reoxidação, maior quantidade de hematita nos sínteres da região inferior, conforme constatado pelos resultados da caracterização mineralógica dos sínteres, por analisador de imagens, apresentados na figura 5.5.

Com a segregação granulométrica promovida pelo I.S.F, as partículas mais grossas de minério de ferro são destinadas para as regiões inferiores fazendo com que grande quantidade de hematita primária permaneça na estrutura do sínter, apesar do nível térmico mais elevado nessas regiões. Os ajustes feitos na granulometria dos minérios, com a elevação das frações que se comportam como partículas nucleantes, favorecem ainda mais a maior presença de hematita no fundo da camada.

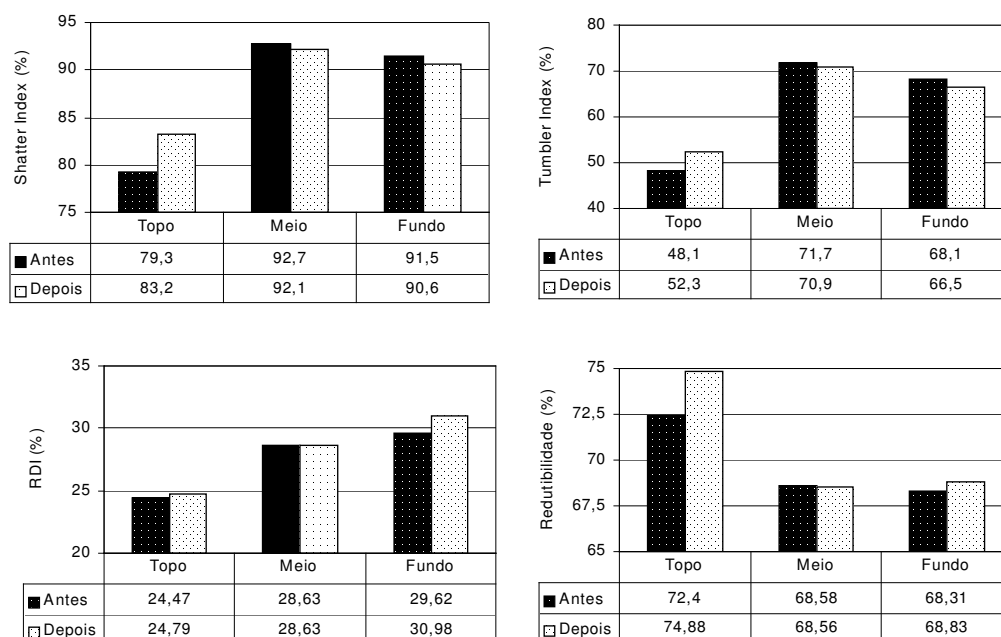


FIGURA 5.4 – Qualidade física e metalúrgica do sínter da MS2, ao longo da altura de camada, antes e após a adequação das matérias-primas.

A tendência observada para a redutibilidade decorre, principalmente, da maior porosidade e quantidade de ferritos de cálcio do sínter das regiões superiores. A maior porosidade aumenta a superfície de contato entre o gás redutor e os óxidos de ferro,

favorecendo a sua redução. A presença de material mais fino, associada a maior quantidade de fundentes e combustível sólido nas regiões superiores do leito, induz a maior formação de ferritos de cálcio nos sínteres dessa região. Com o ajuste das matérias-primas, a intensificação dessa segregação química favoreceu, ainda mais, a formação dos ferritos de cálcio em substituição aos silicatos de cálcio, de baixa redutibilidade. Outro aspecto que contribui para a menor redutibilidade dos sínteres das regiões inferiores é a presença de partículas de hematita primária de maior tamanho, pelo efeito da segregação granulométrica. Isso reduz a superfície específica de contato entre o gás redutor e a hematita, fase de maior redutibilidade no sinter.

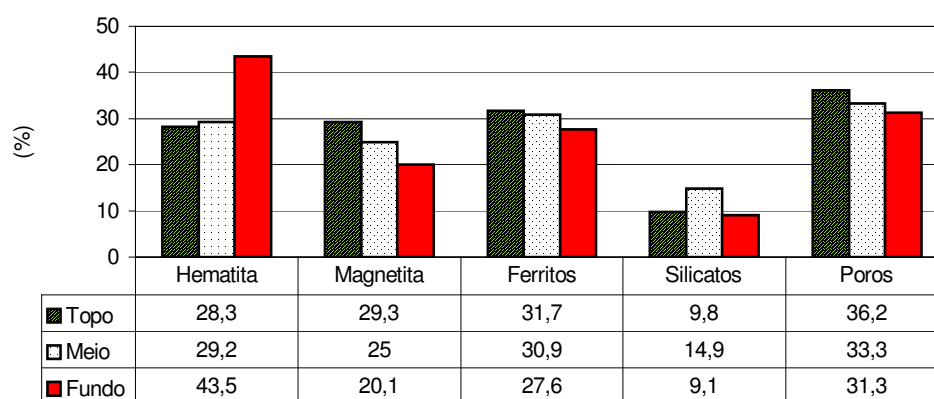


FIGURA 5.5 – Caracterização mineralógica quantitativa dos sínteres da MS2.

5.2. Desempenho Operacional das Máquinas de Sinterização

Em função do programa de expansão da capacidade produtiva da Usiminas, as plantas de sinterização estão tendo que operar em suas capacidades máximas e com índices de funcionamento elevados para atender a demanda dos altos-fornos, mantendo-se a participação de sinter na carga próxima da atual.

A adequação granulométrica das matérias-primas de sinterização às novas especificações ocorreram, na sua maioria, em 1999, com os primeiros resultados sendo obtidos em 2000. Os bons resultados decorrentes desses ajustes têm contribuído muito para o atendimento da maior demanda de sinter, como demonstram os índices de produção, rendimento de sinter e consumo de combustível, apresentados,

respectivamente, nas figuras 5.6 a 5.11. Nelas, estão representados os resultados das MS2 e ou MS3 de 1998 a 2005.

Elevações acentuadas foram obtidas tanto no ritmo de produção das máquinas quanto no rendimento de sínter, associadas ainda a uma ligeira redução do consumo de combustível sólido. Esses resultados se tornam mais significativos com a análise da qualidade química do sínter no mesmo período. Para atender as necessidades dos altos-fornos, reduções contínuas no volume de escória do sínter foram implementadas, como mostrado pela evolução do teor de FeT e da sílica dos sínteres no período (figuras 5.12 e 5.13), sem que isso afetasse os bons resultados operacionais. Antes dos ajustes realizados, esses resultados seriam impossíveis de serem obtidos para as condições de baixo volume de escória, em razão da fragilização do sínter. E, pelo contrário, ocorreu foi uma melhora nos índices de resistências físicas controladas na Usiminas conforme figuras 5.14 e 5.15, com conseqüente redução do volume de escória produzido pelos altos-fornos (figura 5.16), o que resultou numa significativa redução de custos para a produção do gusa líquido.

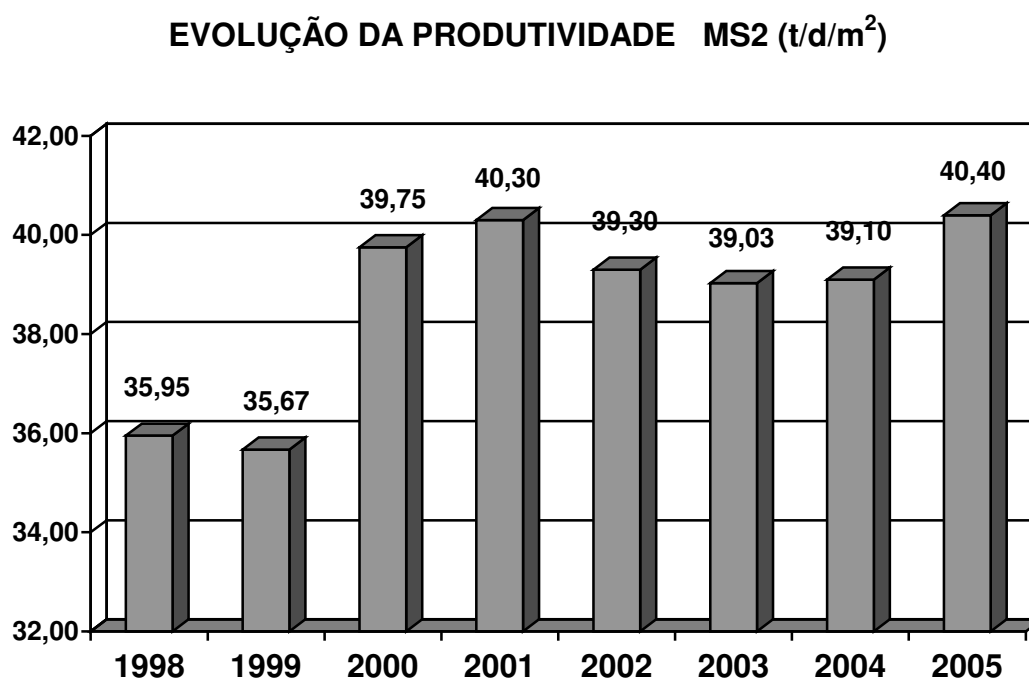


FIGURA 5.6 – Evolução da produtividade na sinterização nº 2 da Usiminas.

EVOLUÇÃO DA PRODUTIVIDADE MS3 (t/d/m²)

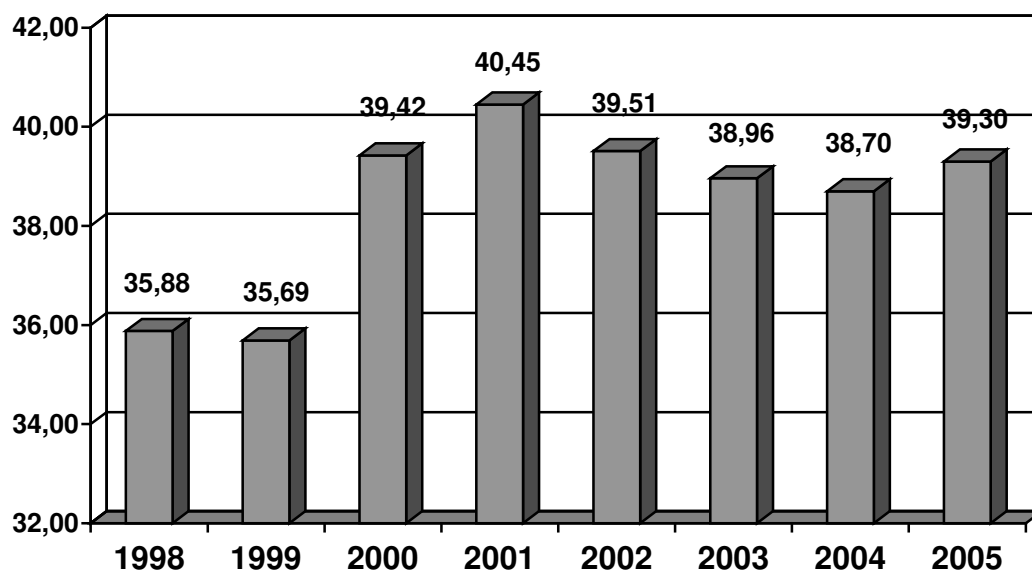


FIGURA 5.7 – Evolução da produtividade na sinterização n° 3 da Usiminas

PRODUÇÃO MS2 (t/h)

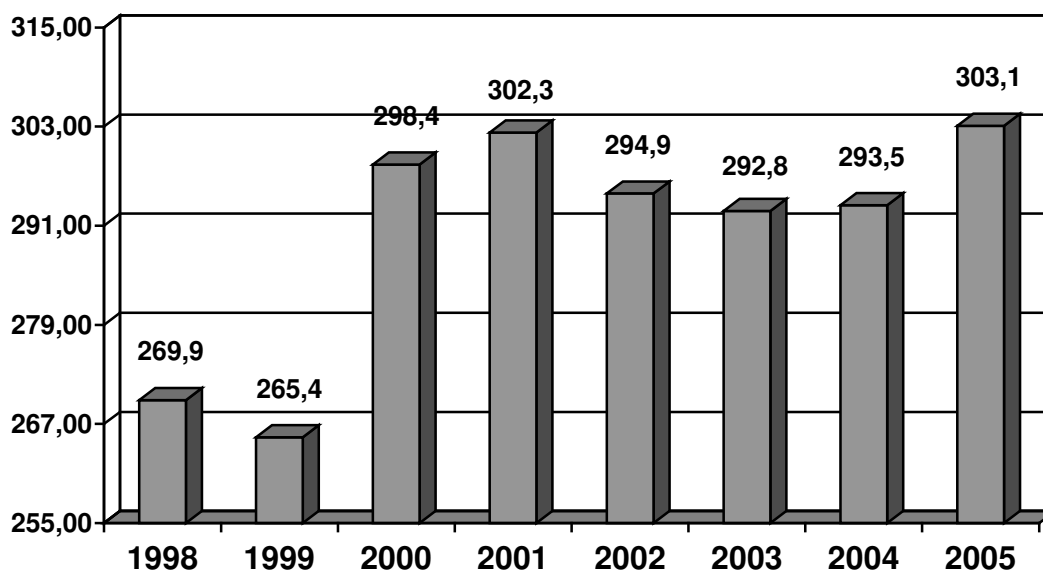


FIGURA 5.8 – Evolução do ritmo de produção em ton/h na sinterização n° 2 da Usiminas

PRODUÇÃO MS3 (t/h)

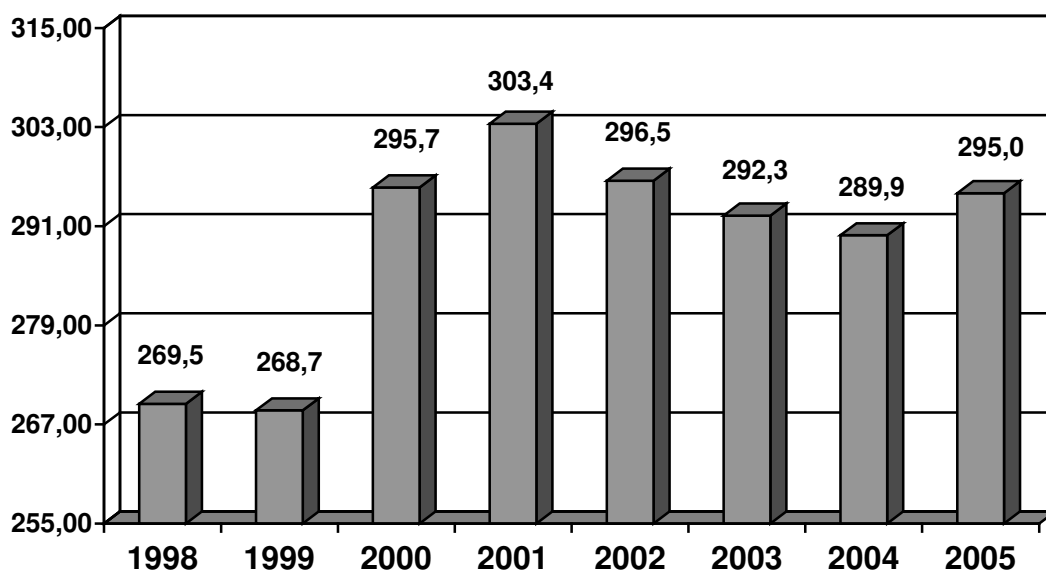


FIGURA 5.9 – Evolução do ritmo de produção em ton/h na sinterização n° 3 da Usiminas

EVOLUÇÃO DO RENDIMENTO DO "BOLO DE SINTER" MS2 (%)

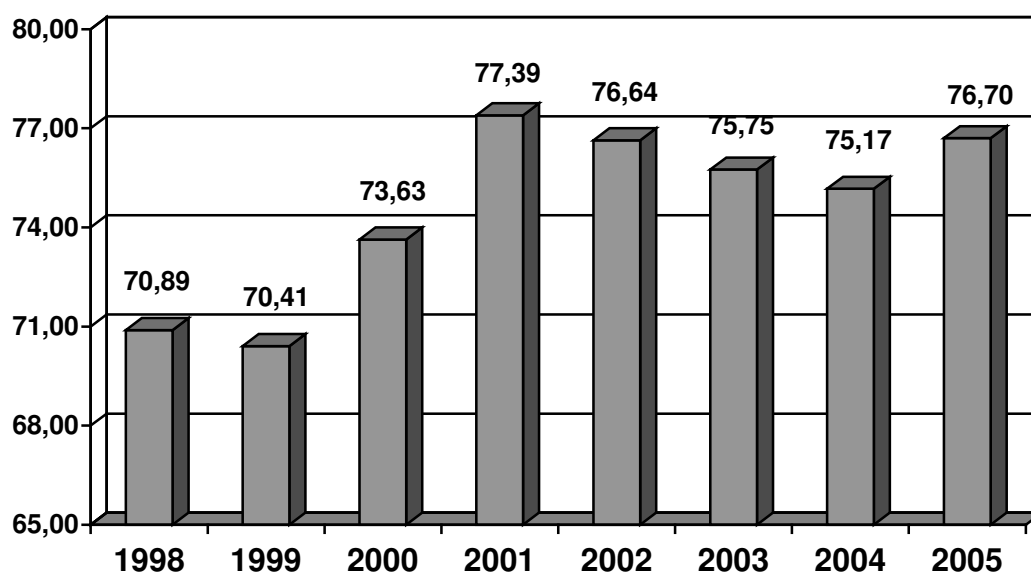


FIGURA 5.10 – Evolução do rendimento do sinter na sinterização n° 2 da Usiminas

EVOLUÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVES SÓLIDOS MS2 (kg/t sínter)

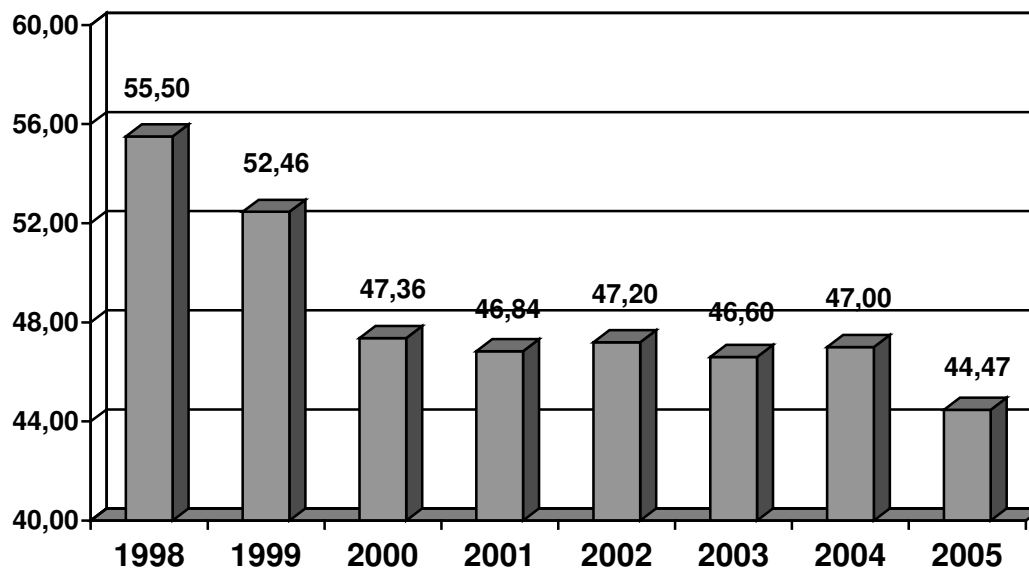
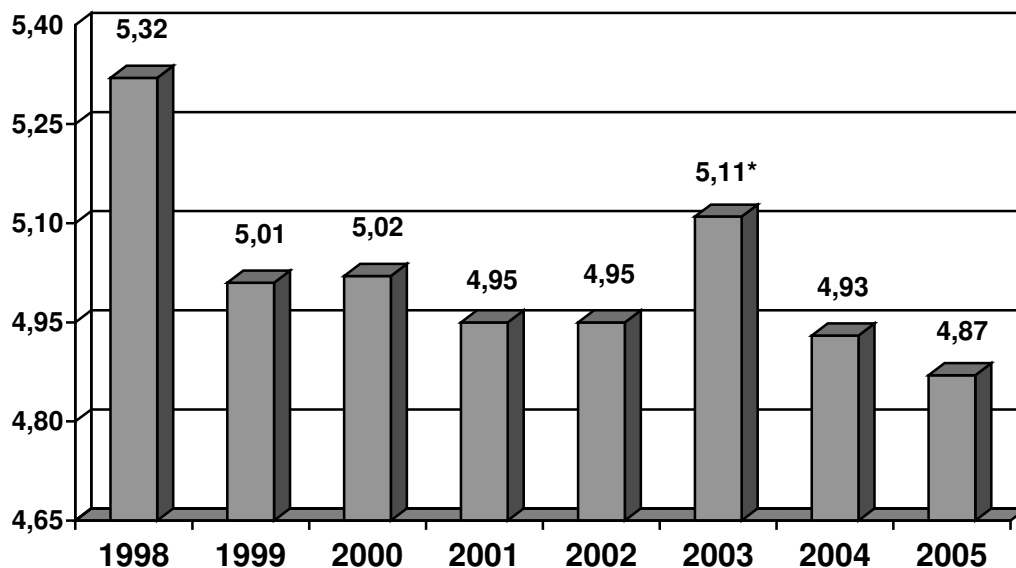


FIGURA 5.11 – Evolução do consumo de combustíveis sólidos (coque + antracito), na sinterização nº 2 da Usiminas

Portanto, o bom desempenho das plantas de sinterização permite concluir que as granulometrias de fundentes e combustíveis estão mais adequadas para a operação com I.S.F. Essa condição não justifica, por si só, esse bom desempenho, devendo ser consideradas ainda a redução da fração super fina e a elevação da fração nucleante dos minérios, que contribuirão para a elevação da permeabilidade do leito com conseqüente aumento de produtividade

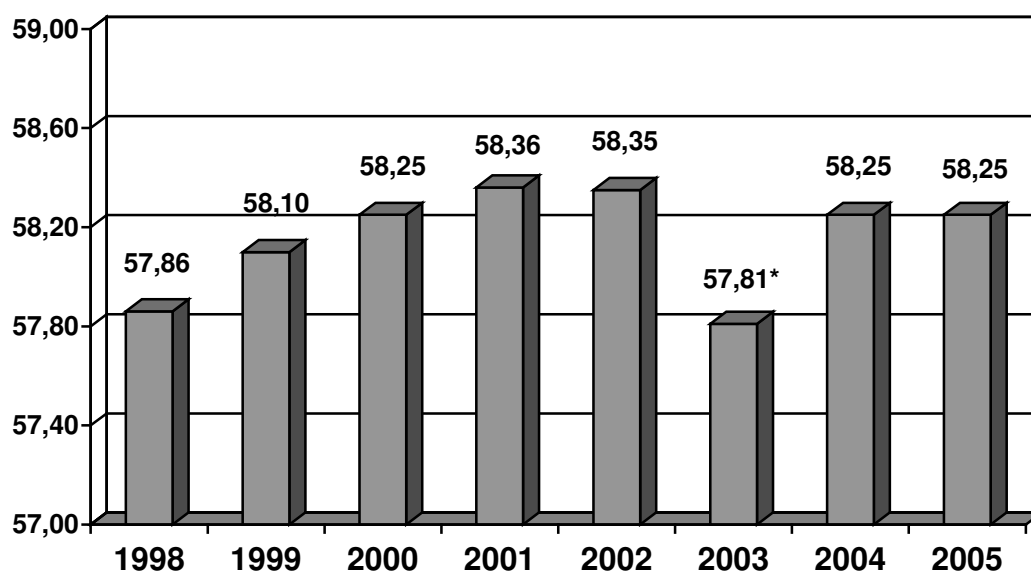
EVOLUÇÃO DA QUALIDADE DO SÍNTER Sílica MS2 (%)



*Saída do *sinter feed* G. Soco.

FIGURA 5.12 – Redução do SiO₂ do sinter na sinterização nº 2 da Usiminas

EVOLUÇÃO DO TEOR MÉDIO DO FERRO MS2 (%)



*Saída do “sinter feed” G. Soco.

FIGURA 5.13 – Elevação do teor de Ferro total do sinter na sinterização nº 2 da Usiminas

EVOLUÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DO SÍNTER
Shatter Index MS2 (%)

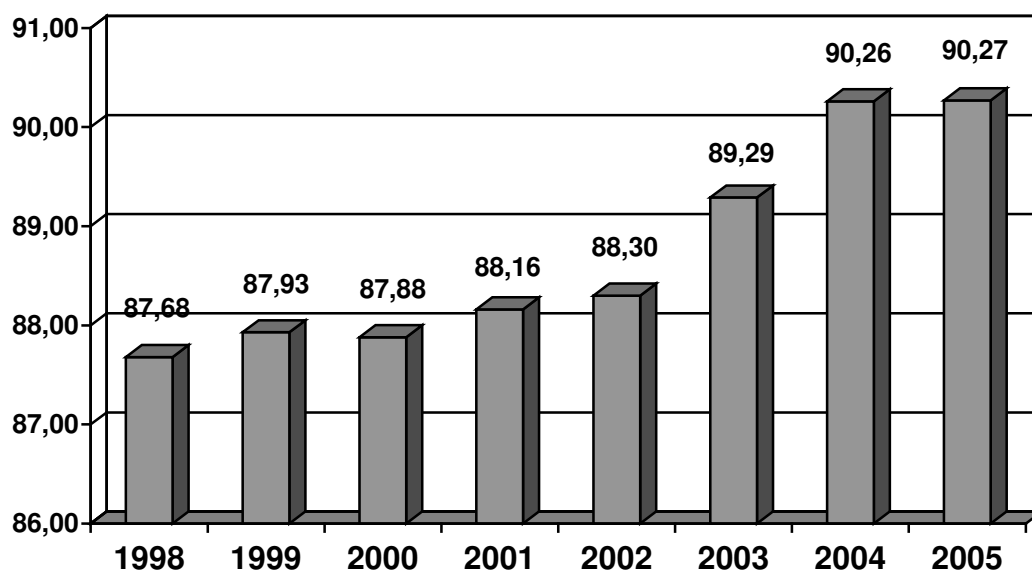


FIGURA 5.14 – Evolução da resistência à degradação do sínter à queda, na sinterização nº 2 da Usiminas

EVOLUÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DO SÍNTER
Tumbler Index MS2 (%)

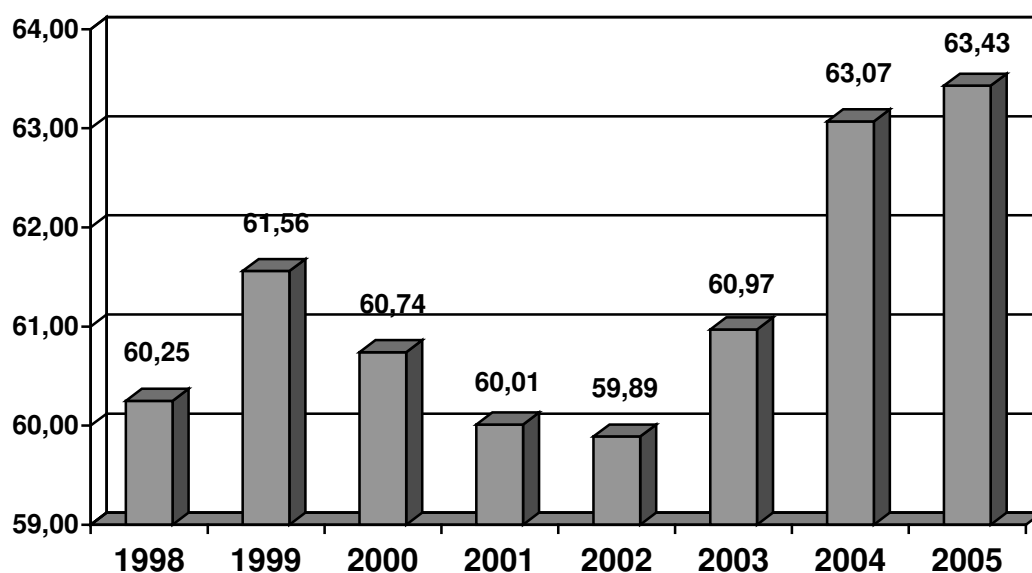


FIGURA 5.15 – Evolução da resistência física do sínter à abrasão, na sinterização nº 2 da Usiminas.

INFLUÊNCIA DA QUALIDADE QUÍMICA DO SÍNTER NOS AF'S *SLAG RATE* (kg/t de gusa)

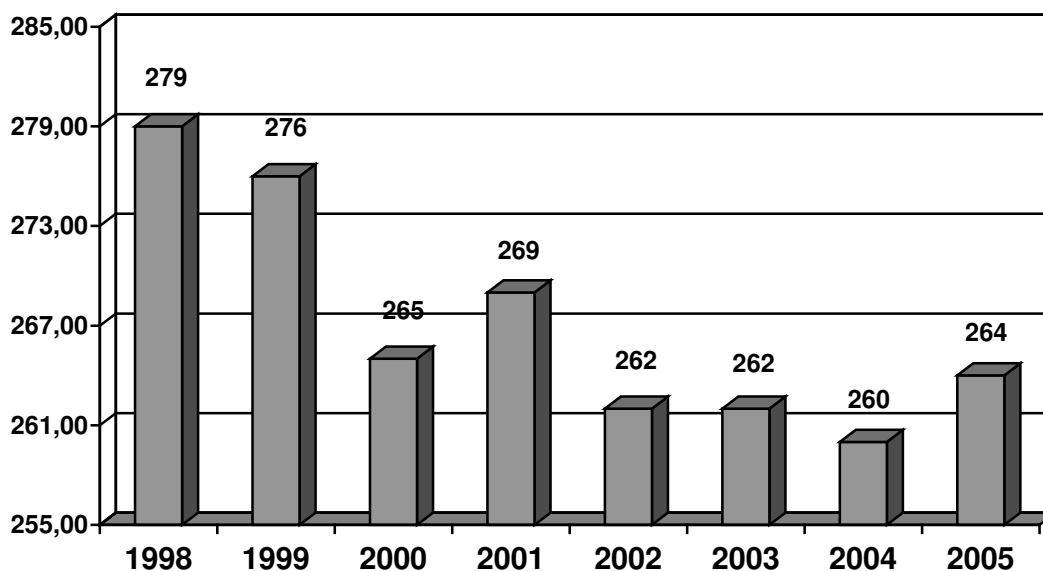


FIGURA 5.16 – Redução do *slag rate* dos altos-fornos da Usiminas, após redução no volume de escória do sinter produzido nas sinterizações da Usiminas.

5.3. Efeito do Engrossamento do Serpentinó na Qualidade e Propriedades do Sinter

Assim como discutido no item 5.1.3, o nível de MgO na mistura e na caracterização do sinter na esteira industrial, apresenta-se sempre elevado nas regiões superiores do leito. Mas, no processo de sinterização, a região inferior do leito é a que apresenta maior aporte térmico, devido ao fato da frente térmica sempre deslocar das regiões superiores para as inferiores, ficando a região superior por um longo período apenas resfriando o sinter já processado. Como a decomposição dos compostos portadores de magnésio demandam altas taxas de energias, nesta condição, o melhor posicionamento das partículas de serpentinó, seriam nas regiões inferiores do leito de sinterização.

5.3.1. Teste Industrial

Para uma inclinação de 45° do I.S.F. da Sinterização N° 3 da USIMINAS, foi realizado um teste industrial com aproximadamente 1.100ton do serpentinó na faixa granulométrica de 03 a 08mm de diâmetro de partículas. Normalmente, as sinterizações

trabalham com o serpentinito na faixa de 0,105mm a 3,0mm (figura 5.17). O que deseja-se, neste caso, é que o I.S.F. direcione as partículas do serpentinito para o fundo da esteira da máquina, local este dotado de um aporte térmico maior que na superfície da esteira. O que, possivelmente, obteria um melhor rendimento do “bolo de sínter”, além de uma redução na dispersão química do sínter devido melhor dosagem. Como se trata de uma mudança drástica na granulometria deste constituinte, verificações nas propriedades físicas e metalúrgicas do sínter produto tornou-se imprescindíveis.

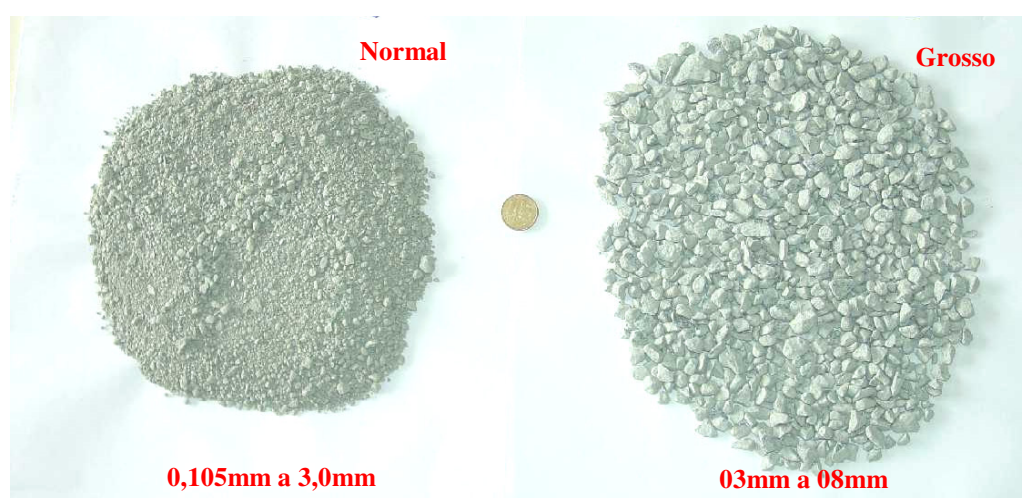


FIGURA 5.17 – Comparações de granulometria do serpentinito: Normal e Grosso.

5.3.2. Indicadores Operacionais – Sinterização N° 3

O teste foi realizado na Sinterização N° 3 da USIMINAS, de 14:00h de 01/06/05 às 2:25h de 05/06/05. Antes e durante a realização do teste, indicadores de produção, temperatura de processo e qualidade do sínter foram monitoradas, conforme apresentadas nas figura 5.18.

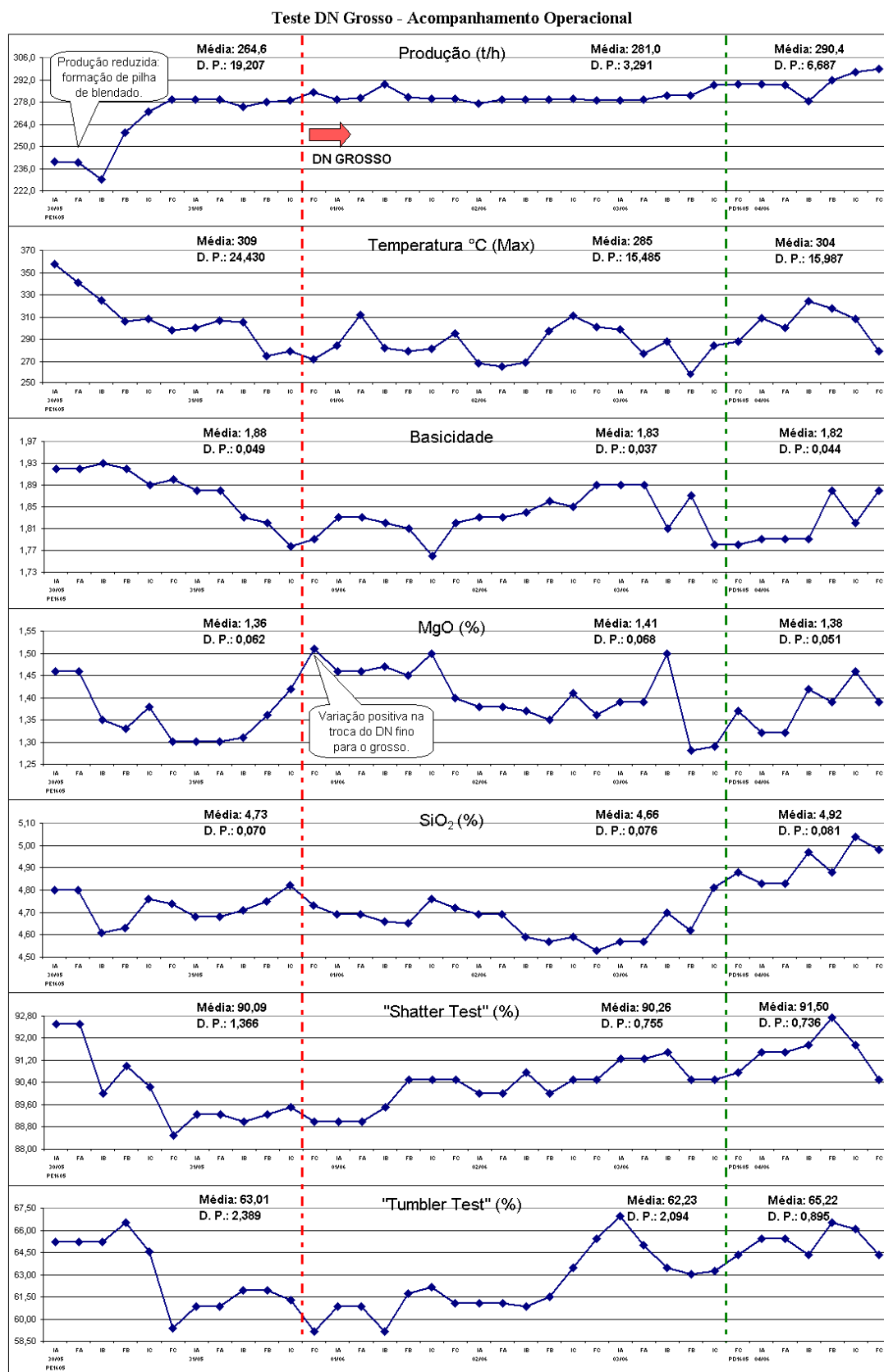


FIGURA 5.18 – Indicadores de processo e qualidade do sinter produzido com o serpentinito de granulometria normal e grosso.

Pela figura anterior (figura 5.18) pode-se constatar que:

- √ Não ocorreu perda de produção com a utilização do serpentinito mais grosso na sinterização nº 3;
- √ Não observou-se queda da resistência física (*Shatter Test, Tumbler Test*) com o uso deste serpentinito;
- √ O desvio padrão do teor de MgO no sínter apresentou-se um pouco mais elevado durante o consumo do serpentinito grosso na sinterização nº 3. Mas, este, foi consumido numa balança reserva da sinterização nº 3, e, durante o consumo do serpentinito, houve necessidade de ajustes na referida balança;
- √ Parâmetros operacionais como temperatura dos gases exaustos não apresentaram tendência de piora, mantendo inclusive, uma maior estabilidade.

5.3.3. Comparação e caracterização do sínter produzido com serpentinito normal e grosso

Utilizando as técnicas descritas no capítulo 4: 4.1 – Metodologia para análise da eficiência de segregação do I.S.F e 4.2 – Metodologia para análise do sínter diretamente na esteira industrial para caracterização; foram retiradas amostras de mistura e sínter produzidos com o serpentinito normal e com granulometria mais grossa, objetivando com isto caracterizar o perfil de distribuição do MgO no sínter ao longo da altura do setor da esteira a sinterizar, bem como avaliar as propriedades físicas e metalúrgicas, comparando-se o sínter produzido com os estes diferentes serpentinitos. A caracterização dos principais elementos na mistura, bem como a qualidade do sínter em todos as posições ao longo do leito da sinterização encontra-se no anexo A7. Para as figuras à seguir, foram calculadas médias aritméticas da qualidade da mistura ou do sínter dos pontos localizados no topo, meio e fundo do leito da sinterização.

Teor de MgO: Com o engrossamento do serpentinito ocorreu o desejado, ou seja, conforme figura 5.19, observa-se que há uma inversão na segregação das partículas da principal fonte de MgO: o serpentinito.

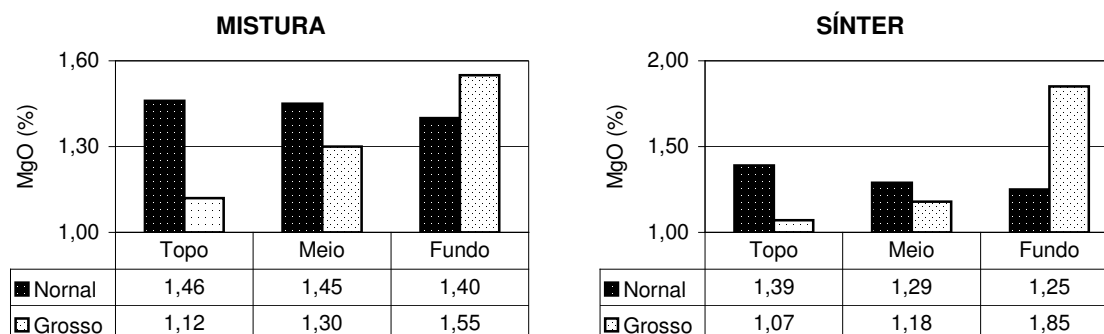


FIGURA 5.19 – Distribuição do teor de MgO na mistura e no sínter com serpentinito de granulometria normal e grosso.

Resistência Física do Sínter: Obtendo-se a média de todos os incrementos amostrados, tanto para o *Shatter Test* e *Tumbler Test*, não observou-se variação da resistência física significativa comparando o sínter produzido com o serpentinito normal e grosso (figura 5.20)

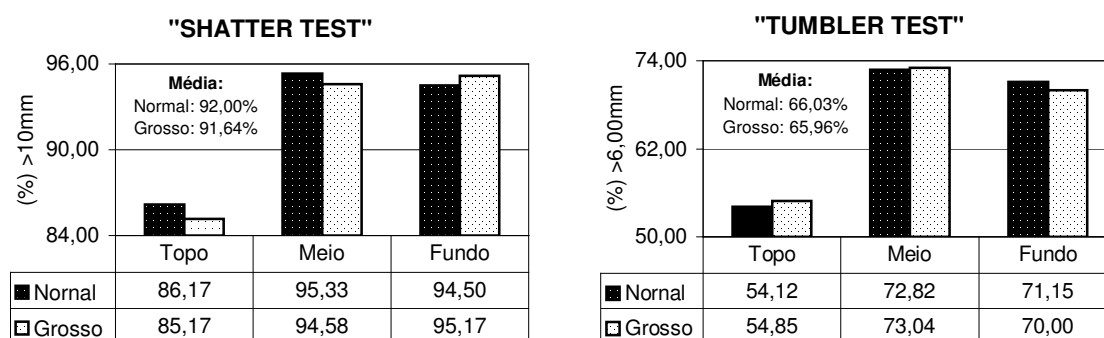


FIGURA 5.20 – Caracterização da resistência física do sínter no setor, produzido industrialmente com o serpentinito de granulometria normal e grosso.

Mas, no caso do *Tumbler Test*, nas regiões superiores da esteira (figura 5.20 – *Tumbler Test* – Topo e Meio), ocorreu uma pequena melhora da resistência do sínter ao tamboramento/abrasão (*Tumbler Test*). O que vem a confirmar que a região mais adequada para a reação das partículas do serpentinito é no fundo da esteira a sinterizar.

Tal comportamento, possivelmente, durante um período maior de operação, melhoraria a performance do rendimento do bolo de sínter ($S/(S+R)$), acarretando reduções de custo operacionais e de elevações de produção.

RDI: O índice de degradação sob redução (RDI), piorou em 2,23 pontos, comparando-se os resultados médios dos sinteres produzidos com os diferentes serpentinitos (figura 5.21), o que poderia estar relacionado à dificuldade de reação das partículas de serpentinito, e, com engrossamento do mesmo, este efeito intensificaria. Resta lembrar que, para a USIMINAS, o controle deste parâmetro é menor que 34%, ou seja, ainda dentro do requerido para o sínter. Mas, como este valor ficou próximo do limite superior de especificação, sugere-se limitar as frações supergrossas de 8,0 para 6,0mm de tamanho máximo para as partículas do serpentinito.

O RDI mostrou uma tendência bem definida de elevação nos sinteres do topo para o fundo do leito de sinterização, em ambos os sinteres produzidos. Pode-se afirmar que esse comportamento é devido a dois aspectos principais: *(i)* o maior nível térmico das regiões inferiores, favorecendo a formação de fases secundárias provenientes de precipitação da fase líquida e de reoxidação, como é o caso da hematita secundária e das calcioferritas colunares; *(ii)* a maior quantidade de hematita dos sinteres da base. Com a segregação granulométrica promovida pelo I.S.F, as partículas mais grossas de minério de ferro destinam-se para as regiões inferiores, fazendo com que grande quantidade de hematita primária permaneça na estrutura do sínter, embora seja elevado o nível térmico nessas regiões. Somando-se a esse fator, tem-se a permeabilidade e vazão de ar elevados, o que favorecem à formação de hematita reoxidada (secundária), mais susceptível à degradação.

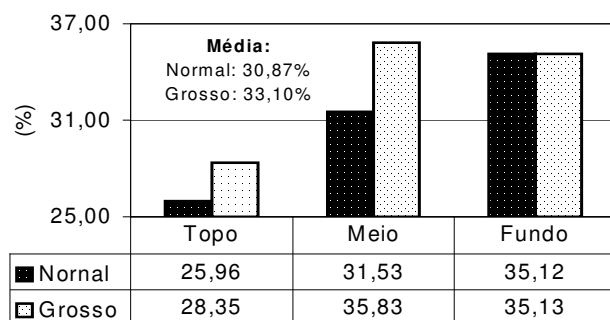


FIGURA 5.21 – Caracterização do índice de degradação sob redução (RDI) do sínter, produzido industrialmente com o serpentinito de granulometria normal e grosso.

RI: O índice de redutibilidade do sínter, apresentou uma melhora de 1,5 ponto, conforme figura 5.22. Tal condição, possivelmente, poderia estar relacionado com elevação da porosidade do sínter, comparando-se o sínter produzido com o serpentinito normal e grosso. Yadav et alii⁽²⁹⁾, em recente estudo, mostra que a redutibilidade do sínter piora com elevações substanciais do MgO, mas, utilizando a fonte do MgO sem alteração na granulometria.

Observando a figura 5.22, nota-se melhores resultados do R.I no topo e no fundo do leito, ao passo que no meio, registrou-se os piores (menores índices de redutibilidade). Os elevados resultados de redutibilidade decorrem, principalmente, da porosidade do sínter, pois a sua elevação aumenta a superfície de contato entre o gás redutor e os óxidos de ferro, favorecendo a etapa de redução. Segundo estudos internos da Usiminas, um aspecto que contribui para a menor redutibilidade dos sínteres é o maior tamanho dos grãos de hematita primária uma vez que reduz a superfície específica de contato entre o gás e a hematita, que é a fase de maior redutibilidade no sínter.

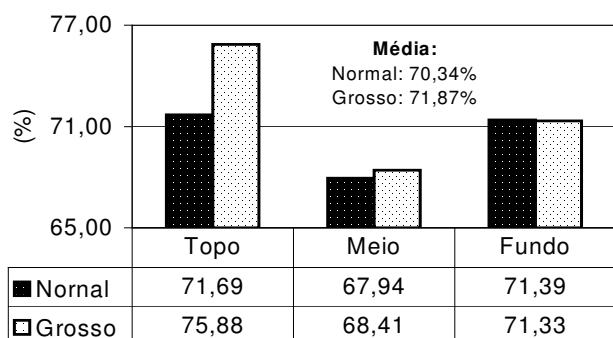


FIGURA 5.22 – Caracterização do índice de redutibilidade do sinter, produzido industrialmente com o serpentinito de granulometria normal e grosso.

Caracterização mineralógica quantitativa do sinter:

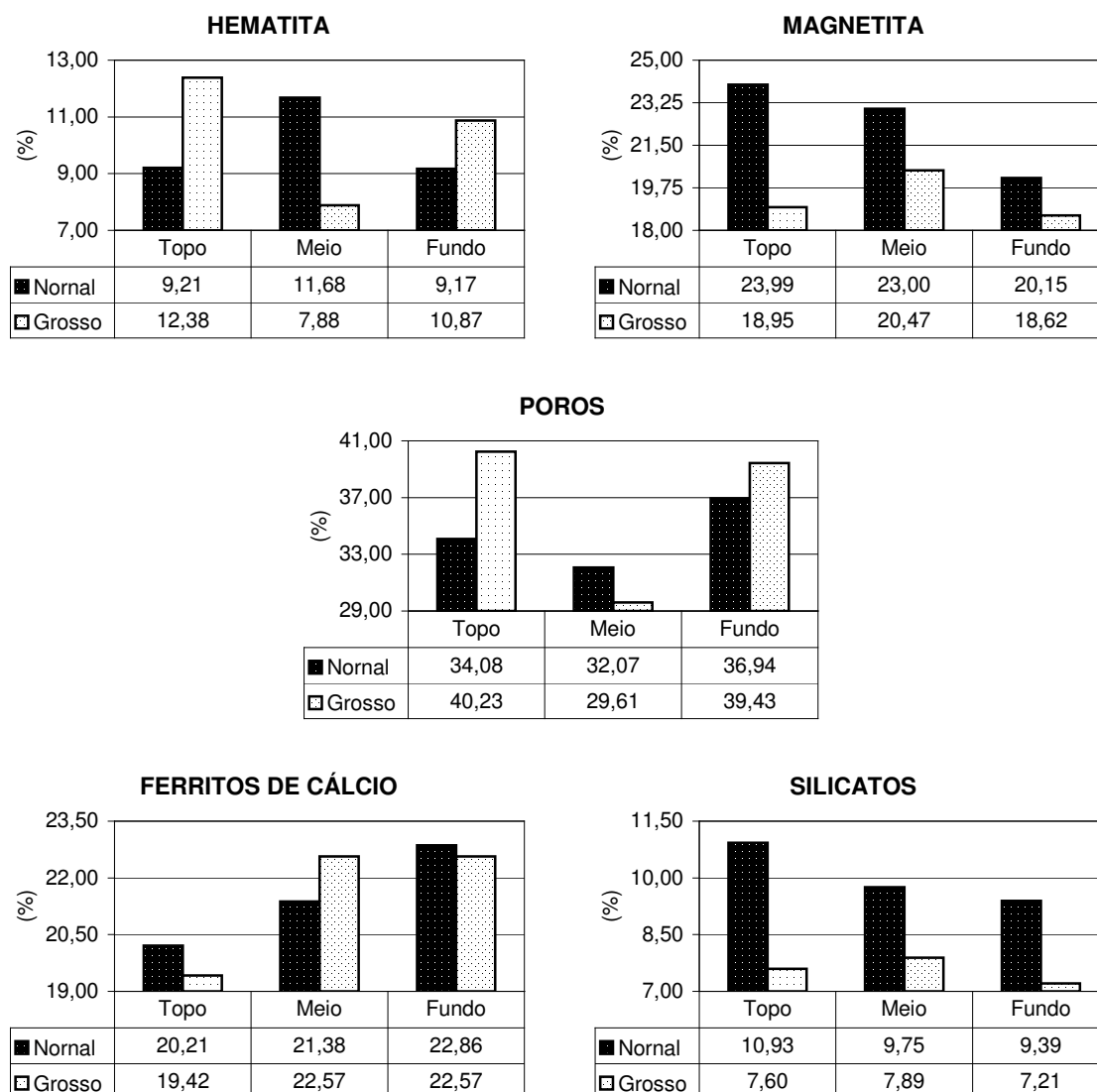


FIGURA 5.23 – Caracterização mineralógica quantitativa do sinter produzido com serpentinito normal e grosso.

Conforme figura 5.23, nota-se uma elevação nos níveis de poros, o que, em conjunto com a redução dos silicatos de cálcio e magnetita, ambos de baixa redutibilidade, confirma a melhora do R.I do sínter produzido com serpentinito de granulometria mais grossa.

Pimenta et alii⁽²⁰⁾ estabelece que as condições mineralógicas dos sínteres são resultados da condição operacional com o segregador de mistura – I.S.F, pois a presença de material mais fino associado a maior quantidade de fundentes, nas regiões superiores do leito, induz a maior formação de ferritos de cálcio e silicatos nestes locais. Porém, os resultados obtidos no presente trabalho não seguiram esta linha, pois as contribuições dos ferritos de cálcio, em ambas os testes produzidos, elevaram-se no topo para o fundo, enquanto que as dos silicatos vítreos mantiveram a tendência indicada pelos autores citados.

A quantidade de poros nos sínteres produzidos em ambas as condições determinada por microscopia quantitativa via analisador de imagem, contabilizou além dos poros presentes, uma quantidade de partículas não-reagidas de serpentinito, principalmente, os de granulometria excessivamente grosseira, uma vez que o programa utilizado não consegue distinguir entre as tonalidades escuras desses dois constituintes. Assim sendo, tornou-se necessária a realização de análise qualitativa para diferenciá-los, principalmente, quanto as suas formas de ocorrências e distribuição.

Análise qualitativa dos sínteres⁽³⁰⁾: De um modo geral, as microestruturas dos sínteres (figuras 5.24 e 5.25), em ambas as etapas apresentaram constituintes comuns, tais como hematita, magnetita, calcioferritas, silicatos vítreos e poros.

A hematita (figura 5.24a – porção mais clara) aparece microporosa, assim como a magnetita (figura 5.24a – porção avermelhada), sendo que essa última aparece, predominantemente, associada às calcioferritas e aos silicatos no caso do sínter produzido com o serpentinito grosso. Nesta condição, observou-se que os poros estão aleatoriamente distribuídos na microestrutura dos sínteres, sob dimensões variadas

(pequenos, médios e grandes). Deve-se destacar ainda a grande quantidade de quartzo que não reagiu durante o processo de sinterização para esta condição.

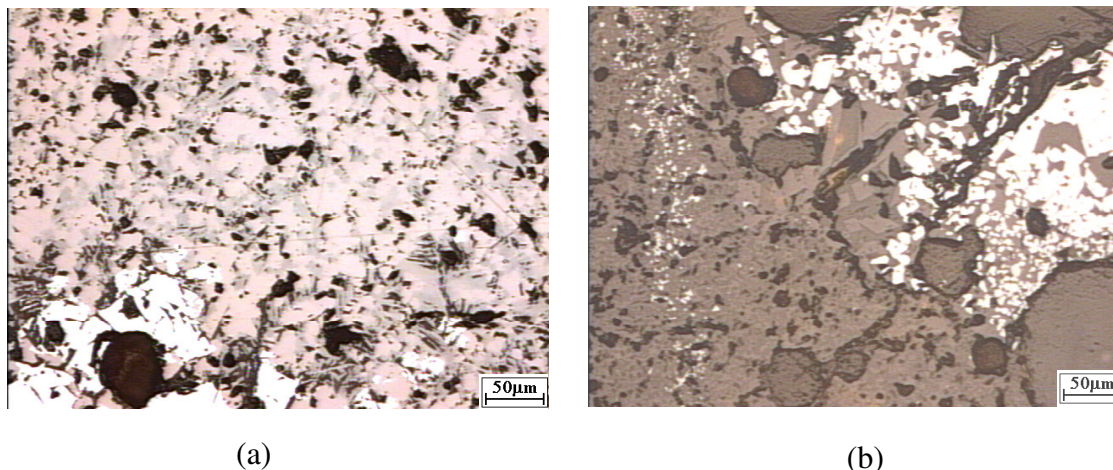
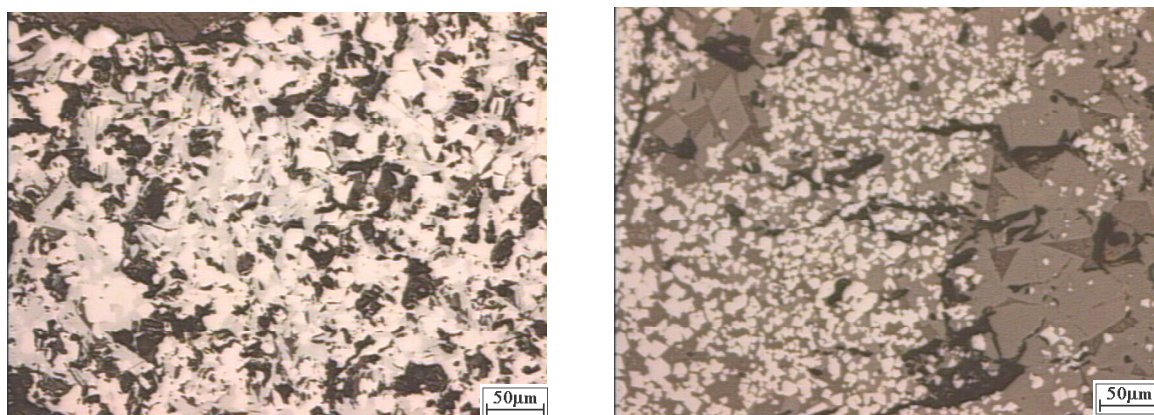


FIGURA 5.24 – (a) e (b) Microestruturas dos sínteres produzidos com serpentinito de granulometria normal⁽³⁰⁾.

Devido à sua pequena participação na mistura a sinterizar, o serpentinito aparece em pequenas concentrações em ambos os sínteres produzidos, todavia os grãos não reagidos ocorrem mais intensamente, e em maiores dimensões, no sínter produzido com serpentinito mais grosso. Esses grãos localizam-se, preferencialmente, perto da camada de reação e dos cristais de magnesioferrita, sob a tonalidade cinza-escuro na luz refletida. Essas porções distinguem-se do quartzo não-reagido, em função das fases envolventes. Para o serpentinito, tem-se uma escória vítrea constituída por CaO , SiO_2 , MgO e FeO , juntamente com cristais de magnesioferrita e calcioferrita. Já o quartzo, apresenta-se envolvido por uma escória da forma de CaO , SiO_2 , FeO e, ao invés de magnesioferrita, tem-se em seu redor hematita e calcioferrita.

Na figura 5.24b, destaca-se um grão grande de serpentinito não-reagido, possivelmente, de diâmetro de partícula acima de 8mm, localizado na zona de transição, onde se verificam os cristais romboédricos de magnesioferrita e o ataque aos cristais de hematita pelo serpentinito. As trincas pretas podem ser, na verdade, cristais de rankinita ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$) e/ou dicálcio silicato ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), dado que são muito parecido e, normalmente, apresenta-se em forma de veios escurecidos semelhantes às trincas numa

matriz de escória vítrea, sendo essa envolta por hematita, magnetita e calcioferrita ternária.



(a)

(b)

FIGURA 5.25 – (a) e (b) Microestruturas dos sínteres produzidos com serpentinito de granulometria grosseira⁽³⁰⁾.

As calcioferritas (figura 5.25a – região cinza-claro) apresentaram formas variadas, desde muito finas até lamelas, em associação com a magnetita (figura 5.25a – região avermelhada) e os silicatos vítreos. Na figura 5.25b, nota-se o ataque do serpentinito à hematita, tornando-a bastante porosa. Observam-se também, alguns cristais de magnésioferrita próximos ao serpentinito não-reagido.

Simulação do comportamento do sinter em relação ao amolecimento e fusão dentro do alto-forno:

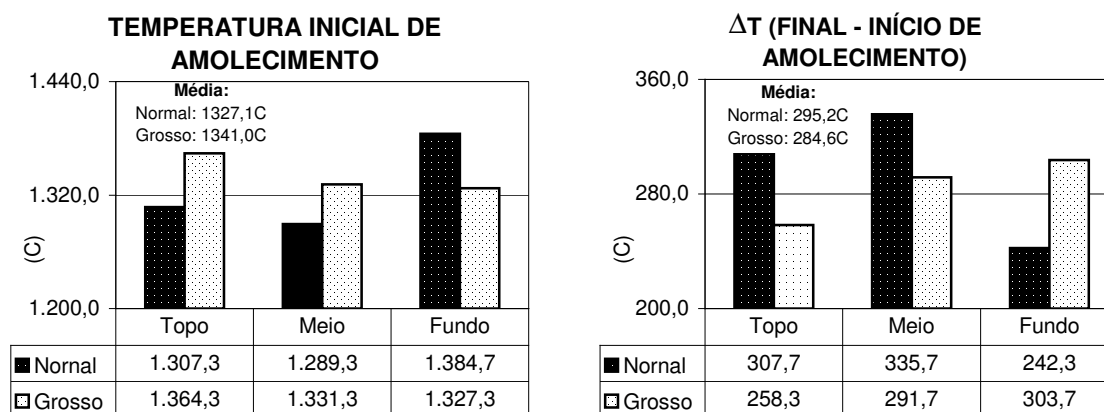


FIGURA 5.26 – Temperatura de início de amolecimento e da diferença (final – início do amolecimento) simulando o sinter no alto-forno.

A modificação da temperatura de amolecimento das matérias-primas carregadas no alto-forno é um dos fatores para o formato da zona coesiva.

O nível da zona de amolecimento e fusão (zona coesiva) tem um papel importantíssimo na operação do alto-forno. Em primeiro lugar, é nesta zona que ocorre a maior perda de carga (resistência ao escoamento gasoso) no alto-forno e em segundo lugar, o bom aproveitamento da redução da carga metálica na zona de preparação vai depender de uma boa distribuição dos componentes (carga metálica e redutor) realizada na zona coesiva. Portanto, para que se possa melhorar as condições de escoamento gasoso seria ideal que a zona de amolecimento e fusão fosse a mais estreita possível, o que equivale dizer que a carga metálica deve ter um alto ponto de amolecimento.

Visando uma redução no custo do gusa produzido pela diminuição do consumo de combustível e aumento de produtividade, utiliza-se a técnica de operação dos altos-fornos com baixos teores de silício no gusa. Tem-se que a sílica contida na cinza do coque e/ou escória é reduzida pelo carbono, na zona de combustão (*race-way*), gerando o monóxido de silício. Este monóxido contido no gás produzido reage com o carbono do gusa incorporando o silício ao metal. Dessa forma, uma das maneiras de inibir a

redução da sílica seria diminuir o tempo de reação, ou seja, o tempo de permanência das gotas de gusa e escória dentro da zona de gotejamento, o que pode ser conseguido através do abaixamento da zona coesiva.

Portanto, uma elevação na temperatura do ponto de amolecimento e redução na variação da temperatura de início e final de amolecimento do sínter pode acarretar ganhos operacionais no alto-forno. De acordo com a figura 5.26, observa-se uma melhora destas propriedades com o sínter produzido com o serpentinito mais grosso. Mas, no fundo do setor, estas propriedades pioraram, o que pode estar relacionado com a granulometria muito grosseira das partículas do serpentinito nestas regiões. Reforçando mais uma vez, a necessidade de limitar/reduzir o tamanho destas partículas.

6. Conclusões

- √ Sistemas de segregação contínuas, tipo I.S.F., exigem grandes alterações tanto nos padrões de operação quanto na granulometria das matérias-primas, principalmente, os minérios tipo *sinter-feed*;
- √ Ajustes na granulometria do principal fundente, o calcário e dos combustíveis sólidos: coque fino e ou antracito, são primordiais, pois, atestadamente influenciam nos resultados finais para sistemas de carregamento com segregação contínua;
- √ A metodologia utilizada para a definição das novas especificações mostrou-se adequada, uma vez que os ajustes feitos resultaram em elevações acentuadas tanto no ritmo de produção das máquinas quanto no rendimento de síter. Esses resultados se tornam mais significativos considerando-se que reduções contínuas ocorreram no volume de escória do síter, sem que isso afetasse os bons resultados operacionais;
- √ Os bons resultados das plantas de sinterização permitem concluir que as granulometrias dos combustíveis sólidos e fundentes encontram-se mais adequadas para a operação com I.S.F. Essa condição não justifica, por si só, esse bom desempenho, devendo ser considerado ainda o engrossamento da mistura pela redução da fração super fina e elevação da fração nucleante dos minérios, que conduziu a uma elevação da permeabilidade do leito com conseqüente aumento de produtividade;
- √ Com relação ao engrossamento do serpentinito:
 - No caso da resistência física do síter ao tamboramento (*Tumbler Test*), nas regiões superiores da esteira, ocorreu uma tendência de melhora, confirmando que a região mais adequada para a reação das partículas do serpentinito é no fundo da esteira a sinterizar,

- O índice de degradação sob redução (RDI) piorou, mas, não significativamente. Sugere-se neste caso, novos testes industriais limitando-se as frações supergrossas em 6,0mm;
- O índice de redutibilidade do sinter (RI) melhorou, possivelmente devido a maior porosidade do sinter e menor formação de silicatos e magnetita, comparando-se o sinter com o serpentinito normal e grosso;
- Ocorreu uma melhora nas propriedades metalúrgicas do sinter: elevação da temperatura de início de amolecimento e redução da zona coesiva, caso o alto-forno operasse com 100% de sinter na carga metálica.

7. Sugestões para Trabalhos Futuros

A principal sugestão é que os estudos que acreditamos foram aqui iniciados sejam prosseguidos. Lembrando que, todas as amostras foram realizadas com o ISF a 45° em relação à horizontal. Sendo assim, novas amostragens e estudos com novas granulometrias poderiam ser realizadas com este equipamento em outros diferentes ângulos, sempre buscando a melhor performance operacional com a qualidade do sinter mais apropriada à operação dos altos-fornos.

Devido à complexidade e dificuldade na realização das amostras de misturas e sinter na planta industrial, os resultados destas análises, poderiam ser utilizadas para adequar o sistema I.S.F piloto desenvolvido pelo Centro de Pesquisa da USIMINAS, objetivando adequá-lo para uma melhor simulação de segregação em relação ao I.S.F industrial.

Referências Bibliográficas

- [1] NAJAR, F.J; SANTOS, J.F. Curso de Sinterização. USIMINAS, Ipatinga, M.G, Brasil, p. 32-66,1981.
- [2] HONORATO, E.P; RANGEL, NAJAR, F. J. - Curso: Utilização do minério de ferro na siderurgia. USIMINAS, Ipatinga, M.G, Ipatinga, M.G, Brasil, p.6-27, 1993
- [3] CARNEIRO, M.A; J. A. N, VIDAL; NAJAR, F. J., – Avaliação de matérias-primas e sua influência na produtividade da sinterização. Metalurgia ABM, 40 (321), Ago, p 429-433, 1984,
- [4] SOMA, H; WAJIMA, M.; HOSOTANI, Y; TASHIRO, K. – Studies on Melt formation of Iron Ore and Application of Study Results to Practical Operation. Proceedings of the 3rd International Symposium on Agglomeration, Germany, p. 2-21, 1981
- [5] FURUI, T. – Technology for preparation of raw materials to be sintered. Nippon Steel Technical Report Overseas, n° 10, November, p. 36, 1977.
- [6] ARAÚJO FILHO, G. M. – Caracterização de misturas para sinterização. Dissertação de Mestrado aprovada pelo CPGEM/EEUFMG, Belo Horizonte, 1984.
- [7] ISHIKAWA, Y.; KASE M.; SAZAKI, M. – Recent progress in the sintering technology – high reducibility and improvement of fuel consumption. Ironmaking conference proceedings, AIME, v 42, p 80 – 89, 1982.
- [8] ROLLER, P.W.– Granulation of iron ore sinter feeds. BHP Technical Bulletin, v 25, n° 1, May, p.79, 1981.
- [9] ARAÚJO FILHO, G.M, TORRES, B. SESHADRI, V. Características de mistura para sinterização. Metalurgia – ABM, v42, n338, p 19 – 23, 1986.
- [10] NOGUEIRA, P.R.S.M. Relação entre características das frações grossas do minério, produtividade e qualidade do sínter. Belo Horizonte. CPGEM/EEUFMG, 1987. (Dissertação de mestrado).
- [11] CAPORALI, L. et alii. Relação microestrutura – propriedades – desempenho de minérios de ferro na sinterização. In: Seminário de redução de minérios de ferro, 29, 1998. Belo Horizonte. ABM, p 701 –717, 1998,.
- [12] ROSIÈRE, C. A.; QUADE H.; SIEMES, H.; et alii. Um modelo para para evolução microestrutural de minérios de ferro do quadrilátero ferrífero. Parte II – Trama, textura e anisotropia de susceptibilidade magnética – Geonomus, v 4, n° 1, p 61 – 75, 1996.
- [13] ROSIÈRE, C. A . Classificação genética de minérios de ferro – Problemas e vícios – Proposta de uma classificação tipológica para a indústria. Seminário de redução de minério de ferro, Vitória, p 295 – 302, 1997,.
- [14] VIEIRA, C.B; ROSIÈRE, C. A; PENA, E. Q; SESHADRI V.; ASSIS, P.S. - Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras: Uma análise crítica. REM, Esc. de Minas de Ouro Preto, 56(2), 97-102,

2003.

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

[16] DE, A; GUPTA, S.S.; CHATTERJEE, A; MUKHERJEE, T. – Possibility of Dunite Usage in Sintermaking: Studies at Tata Steel. Ironmaking and Steelmaking, 1995, Vol 22, N°1

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

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

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

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

[21] PIMENTA, H.P; SESHADRI, V. – Influence of Al₂O₃ and TiO₂ on reduction and degradation behaviour at low temperatures. Ironmaking and Steel making, vol 29, N°3, p.175-179, 2002.

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

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

[24] BENTES, M.A.G. – Elevação da produtividade em sinterizações pela adequação do carregamento da mistura. Metalurgia e Materiais, v.50, n°430, 1994, p.610-615.

[25] BENTES, M.A.G.; SESHADRI, V. – Studies on segregation of sínter mixes during charging in thr iron ore sintering process. 3rd International Syposium on Beneficiation and Agglomeration. Bubaneswae, Indi, p. 93-110, 1991.

[26] NIPPON STEEL CORPORATION. Development of a new type of feeding method for homogenization of sintering reaction. Iromaking Conference Proceedings, 1990, p 589 – 601

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

- [28] OLIVEIRA, D.; PINHEIRO, P.; NAPOLEÃO, A. – Metodologia para avaliar minérios para sinterização com leitos intensamente segregados. XXXIII Seminário de Redução de Minério de Ferro, ABM, Ouro Preto, M.G, Brasil, p.139-149, 2003.
- [29] YADAV, U.S.; RANJAN, A; DAS, B.K; GHOSH, S. – Evolution of sinter quality at Tata Steel. The 5th European Coke and Ironmaking Congress, Stockholm – Swiden – Second Volumew, Tu 9: 1-16, june 2005
- [30] SILVA, M.S.S; CAMILO,G; SCUDELLER, L. M; HONORATO, E.P. – Avaliação da influência da granulometria do serpentinito na qualidade da mistura e do sinter da MS3. Relatório interno do Centro de Pesquisas da Usiminas (RAMR5348), dezembro de 2005, Ipatinga, M.G.

Publicações do Autor Relacionados com o Trabalho

1. Implantação do Sistema de Carregamento I.S.F nas Sinterizações da USIMINAS.

Autores: Edilson Pinto Honorato, José Aládio Domingues Guimarães e José Ramos Bastos

Apresentação: II Simpósio de Minério de Ferro da ABM, 1999, Ouro Preto, M.G. Brasil

2. Estudo da Adequação da Granulometria das Matérias-primas de Sinterização na USIMINAS

Autores: Hamilton Porto Pimenta, Edilson Pinto Honorato e José Ramos Bastos

Apresentação: XXXI Seminário de Redução de Minério de Ferro da ABM, 2000, Santos, S.P.

8. Anexo

ANEXO A.1 – Metodologia do teste de choque, *Shatter Test*

A metodologia baseia-se na norma JIS M 8711. Os principais procedimentos operacionais deste método são os seguintes:

- Determina-se a distribuição granulométrica do material, nas malhas de 10, 25 e 50mm;
- Compõe-se uma amostra de 30kg (P1) para minério de ferro e 20 kg (P1) para o sínter, segundo a distribuição granulométrica encontrada;
- Submete-se a amostra a quatro quedas sucessivas de 2m de altura;
- Faz-se o peneiramento do material em malha de 10mm, tomando-se o peso do retido (P2);

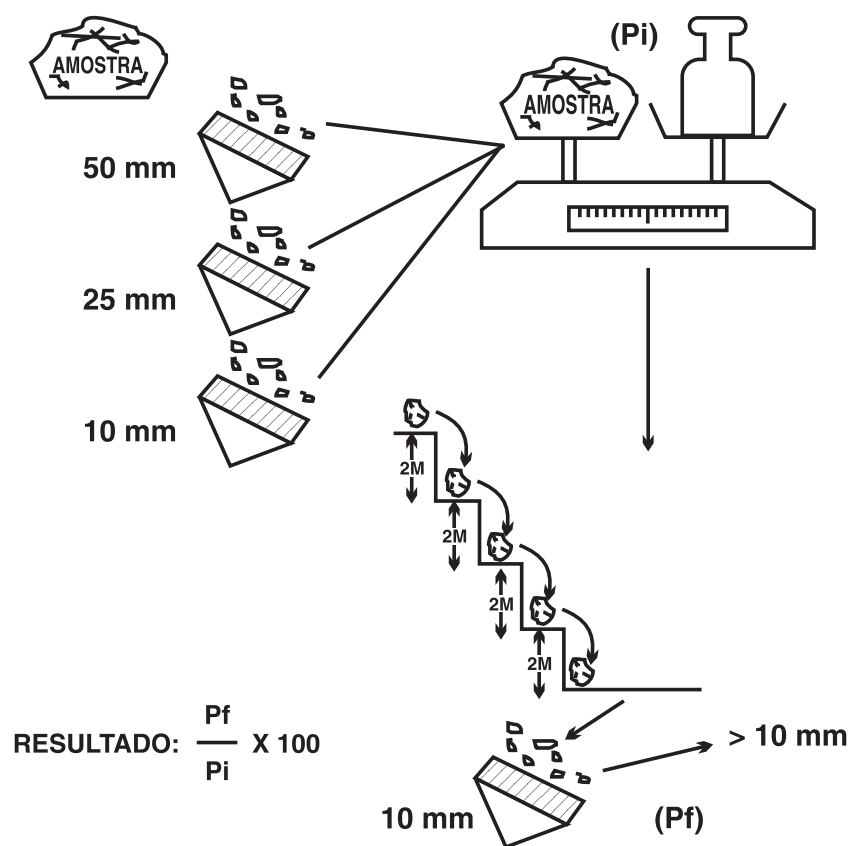
Resultado:

$$\text{S. T.} = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

Aprovação:

$$\left\{ \begin{array}{l} + 10\text{mm} \geq 92,0\% \text{ para minério de ferro} \\ + 10\text{mm} \geq 89,0\% \text{ para sínter} \end{array} \right.$$

A figura abaixo representa o esquema do *Shatter Test*.



Esquema do *Shatter Test*⁽²⁾.

ANEXO A.2 – Metodologia do teste de Tamboramento, *Tumbler Test*

A metodologia baseia-se na norma JIS M 8712. Os principais procedimentos operacionais deste método são os seguintes:

Determina-se a distribuição granulométrica no material nas malhas de 6,3; 10; 25 e 50mm; para minérios e 10; 25 e 50mm para sínter.

Compõe-se uma amostra de 11,3kg (P1) para minério e 23kg para sínter, segundo a distribuição granulométrica encontrada;

Coloca-se a amostra em um tambor rotativo e a submete a 200 voltas consecutivas;

Faz-se o peneiramento do material em malha de 6,3mm para minério e 10mm para sínter, tomando-se o peso do retido (P2);

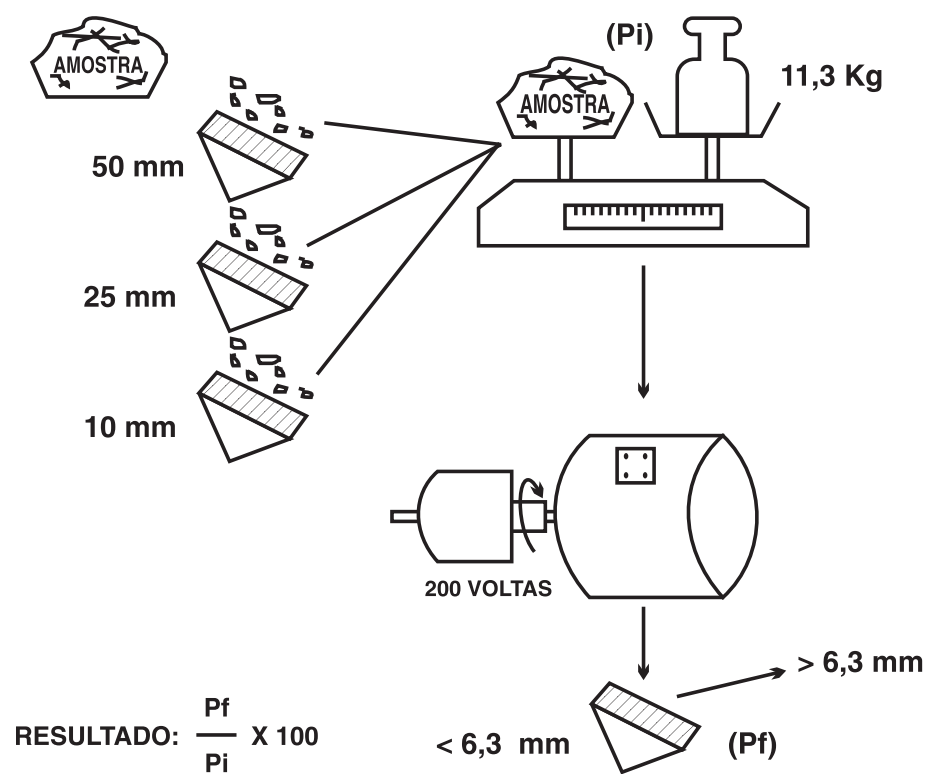
Resultado:

$$\text{T. T.} = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

Aprovação:

$$\left\{ \begin{array}{l} + 6,3\text{mm} \geq 75\% \text{ para o minério.} \\ + 6,3\text{mm} \geq 60\% \text{ para o sínter.} \end{array} \right.$$

O esquema do teste é mostrado na figura abaixo.



Esquema do *Tumbler Test*⁽²⁾.

ANEXO A.3 – Metodologia para determinação do “RDI” do sinter

A metodologia baseia-se em procedimentos desenvolvidos pela N.S.C para este tipo de ensaio. Os principais etapas deste método são os seguintes:

Classifica-se a amostra na faixa granulométrica de 16 a 20 mm;

Pesa-se 500 g de material nesta faixa (P_i);

Coloca-se a amostra em uma retorta e a submete à redução pela passagem de gás (30% CO e 70% N₂; vazão de gás = 15NI/min, à temperatura de 550C durante 30min);

Resfria-se a amostra e a submete a um tamboramento de 900 voltas;

Faz-se o peneiramento do material em malha de 2,83mm e determina-se peso passante (P_f);

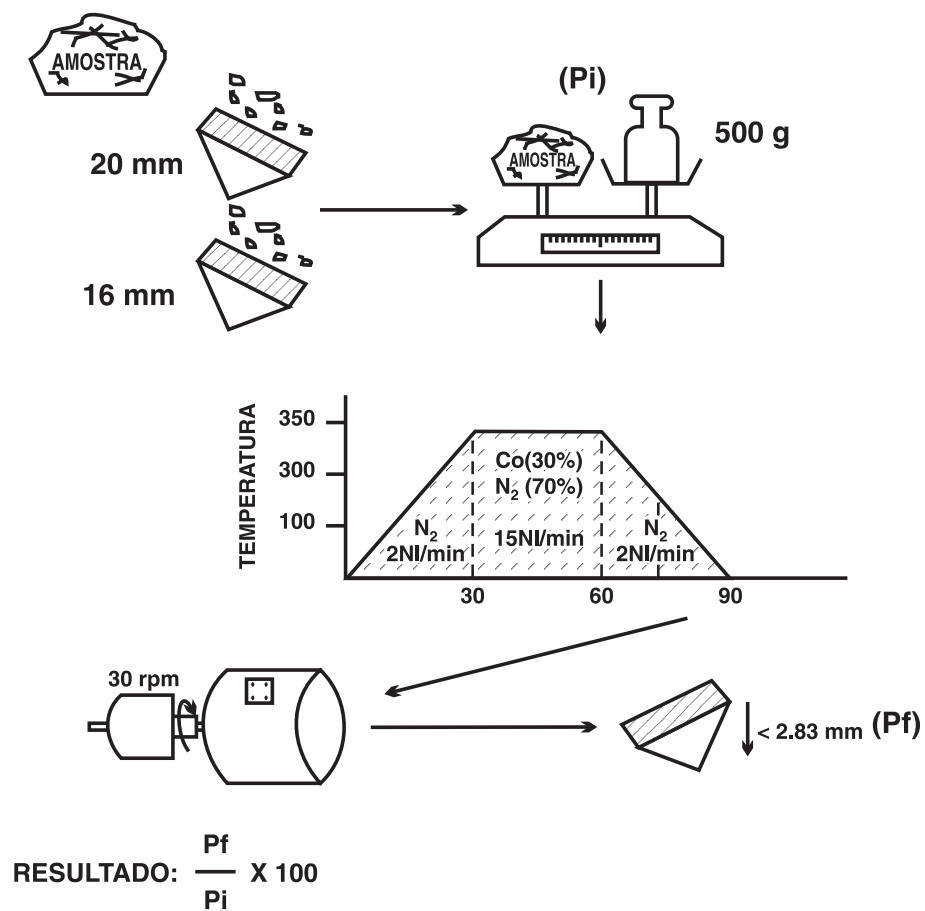
Resultado:

$$\text{RDI} = \frac{P_t}{P_i} \times 100\%$$

Aprovação:

$$\left\{ \begin{array}{l} - 2,83\text{mm} \leq 20,0\% \text{ para minério de ferro;} \\ - 2,83\text{mm} \leq 34,0\% \text{ para sinter.} \end{array} \right.$$

Tem-se na figura abaixo o esquema do RDI⁽²⁾.



Esquema do RDI⁽²⁾.

ANEXO A.4 – Metodologia para determinação da Redutibilidade, “RI” do sinter

A metodologia baseia-se na norma JIS M 8713. Os principais procedimentos operacionais deste método são os seguintes:

Classifica-se a amostra na faixa granulométrica de 16 a 20mm;

Pesa-se 500g de material nesta faixa (Pi);

Coloca-se a amostra em uma retorta e a submete à redução pela passagem de gás (30% CO e 70% N₂; vazão de gás = 15Nl/min, à temperatura de 900C durante 180 min);

Realiza-se análises do gás efluente em intervalos de tempo determinados;

Resfria-se a amostra e determina-se o seu peso final (Pf);

Resultado:

$$R.I = \frac{P_i - P_f}{\frac{P_i}{100} [(\% FeT \times 0,429) - (\% FeO \times 0,111)]} \times 100$$

$$R.I . = \frac{O_{(removido)}}{O_{(removível)}} \times 100 = \frac{O_{(ro)}}{O_{(rl)}} \times 100$$

$$O_{(ro)} = P_i - P_f$$

$$O_{(rl)} = \frac{P_i}{100} [(\% Fet \times 0,429) - (\% FeO \times 0,111)]$$

$$O_{(removível)} = O_{(Fe_2O_3)} + O_{(FeO)}$$

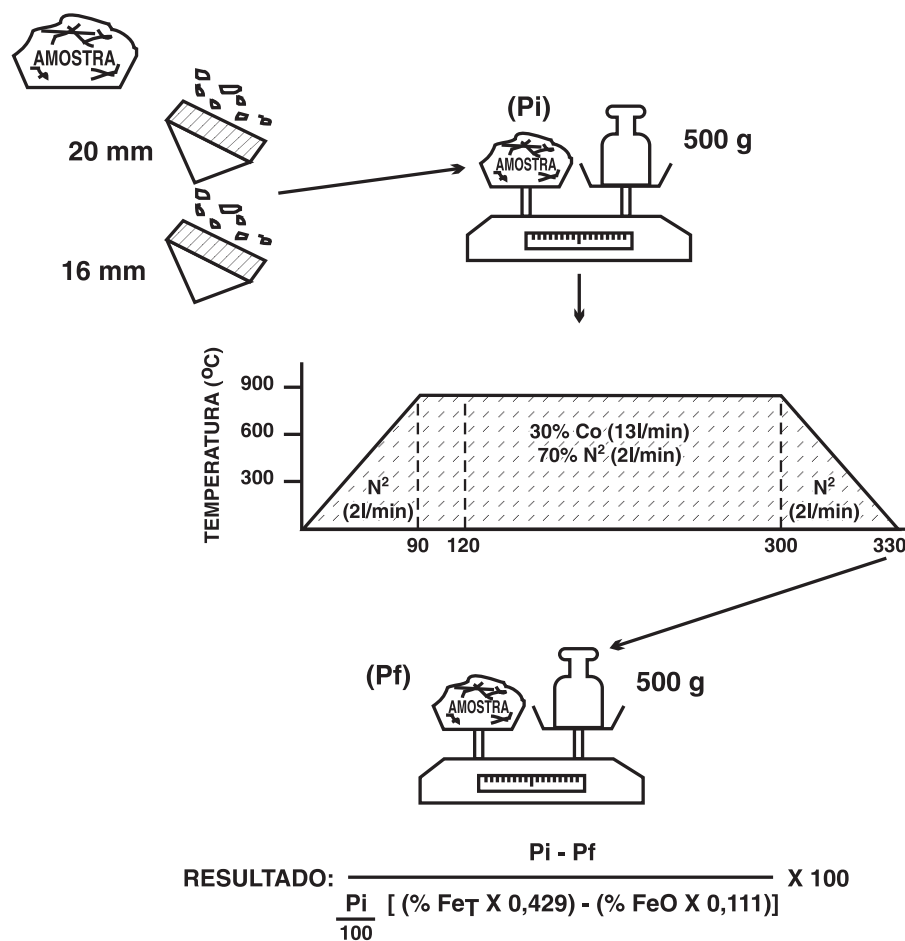
$$O_{(Fe_2O_3)} = \frac{48}{112} \times (Fet - \frac{56}{72} \times FeO) = (FeT - 0,777 FeO)$$

$$\frac{O}{(FeO)} = \frac{16}{72} \times FeO = 0,222 \times FeO$$

$$O_{(removível)} = 0,429 (FeT - 0,777 FeO) + 0,222 \times FeO = 0,429 \times FeT - 0,111 \times FeO$$

Obs.: O grau de redução pode ser também determinado através da análise do gás efluente (em % de CO₂).

A representação esquemática do teste é mostrada na figura abaixo.



Representação esquemática do Teste de Redutibilidade⁽²⁾.

ANEXO A.5 – Ensaio de Amolecimento e fusão sob carga – Método Usiminas

O ensaio consiste em aquecer uma carga metálica (sínter, minério ou pelota) na granulometria 9,52 ~ 12,7mm, até a temperatura de 1650°C, em 390 minutos. Durante este aquecimento, são registrados a temperatura, a pressão e o deslocamento da carga, para avaliação do amolecimento e fusão da carga metálica.

O ensaio:

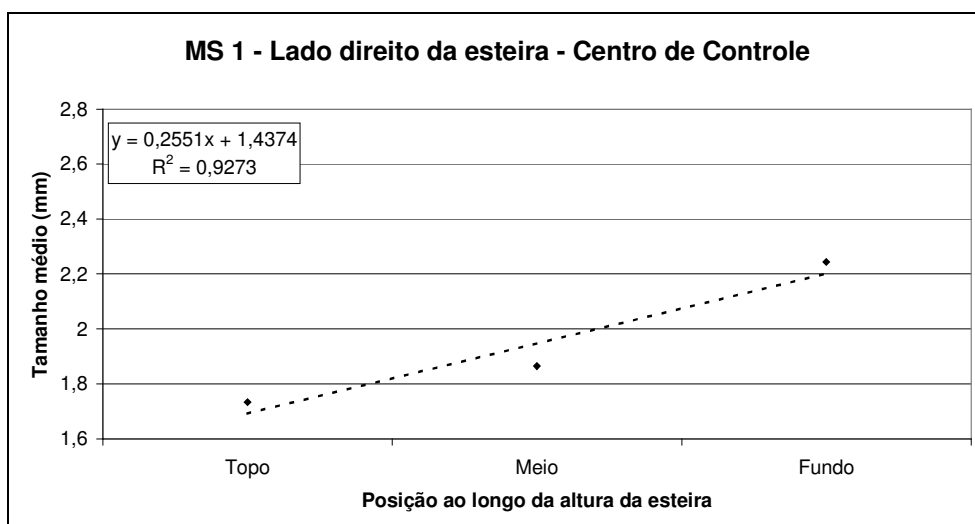
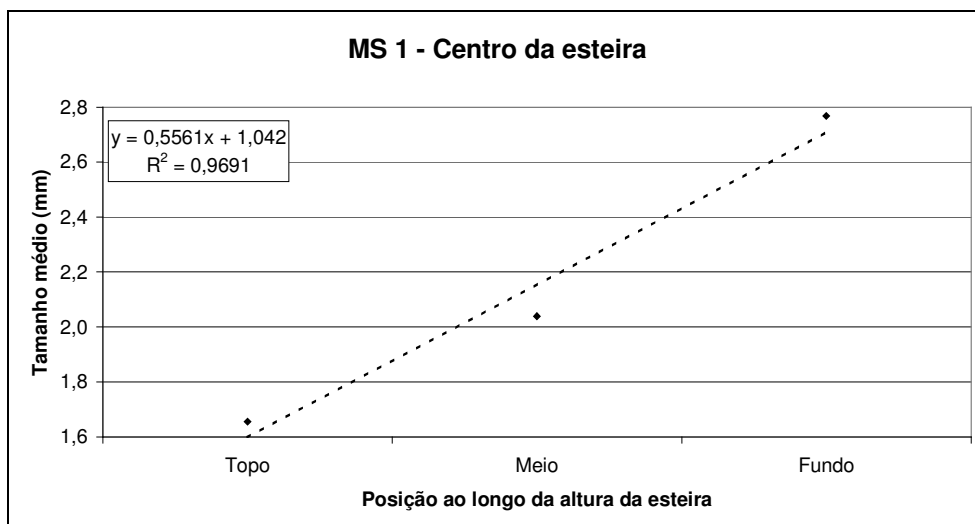
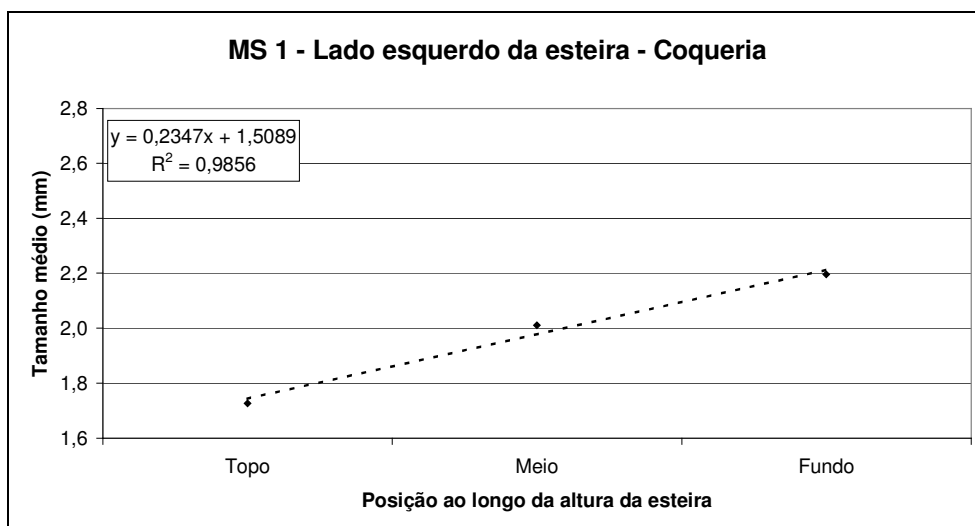
- ◆ Separar a amostra e levá-la à estufa durante 1 hora a $105 \pm 10^\circ\text{C}$;
- ◆ Esperar esfriar;
- ◆ Colocar na câmara de amostra uma camada de 25mm de coque destilado, granulometria de 6,35 ~ 9,52mm, nivelando-a;
- ◆ Colocar sobre o coque uma camada de 60mm de carga metálica (minério, sínter ou pelota), granulometria de 9,52 ~ 12,7mm, nivelando-a;
- ◆ Colocar sobre a carga metálica uma camada de 35mm de coque destilado, granulometria de 6,35 ~ 9,52mm, nivelando-a;
- ◆ Colocar a câmara de carga dentro do cadinho;
- ◆ Fechar o forno;
- ◆ Interligar as mangueiras de gás e refrigeração;
- ◆ Colocar os pesos no apoio de carga (24,70Kg);
- ◆ Ligar e ajustar o sistema de medida de pressão e deslocamento de carga;
- ◆ Ligar o nitrogênio com uma vazão de 7Nl/min;
- ◆ Checar possíveis vazamentos de água e gás no forno (caso haja algum vazamento, solucioná-lo);
- ◆ Preparar o sistema de aquisição das curvas de acompanhamento de ensaio (micro);
- ◆ Checar a fonte de aquecimento do forno, pois esta fonte atende também ao forno de combustibilidade, devendo portanto verificar a posição da ligação dos barramentos, a chave seletora, o programa 1 e a condição Automático/Manual, que deve estar no Automático;

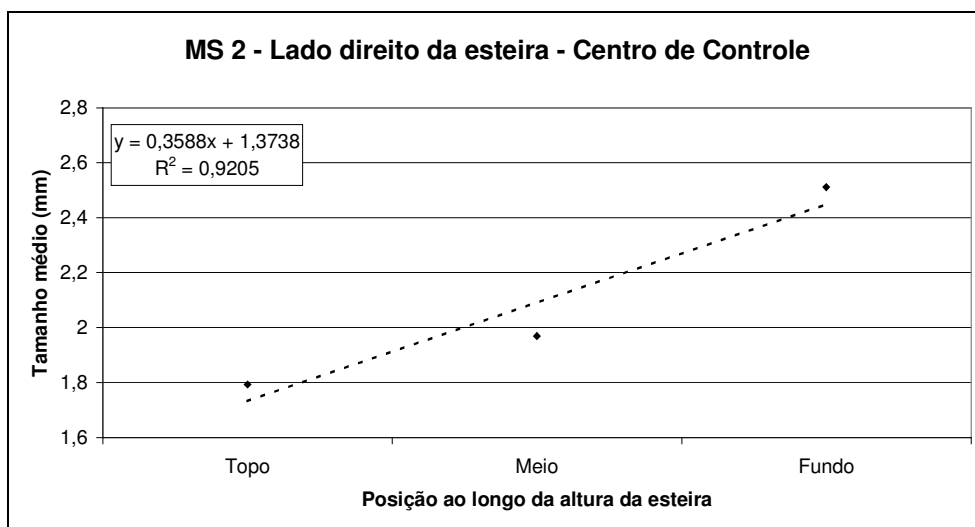
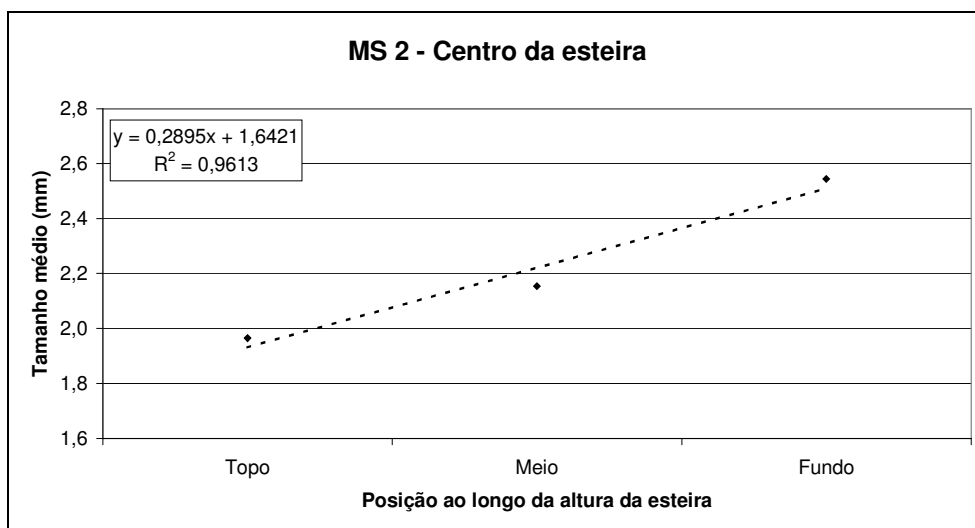
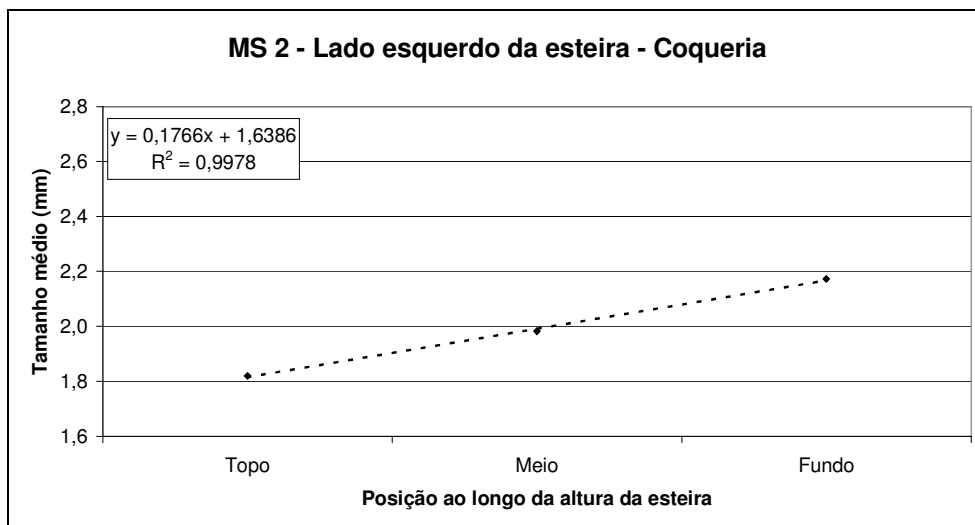
- ◆ Ligar o programador e o sistema de medida de pressão e deslocamento de carga;
- ◆ Acompanhar o ciclo de aquecimento do ensaio (25 ~ 1650°C), este ciclo é dividido em 6 rampas de aquecimento, conforme descrito no item do ciclo de aquecimento em 5.2.1. No início da terceira rampa, troca-se o gás N₂, que está sendo injetado no forno, pelo gás redutor (30% de CO e 70% de N₂, vazão de 7NI/min), até atingir 1650°C;
- ◆ Desligar o forno e a aquisição das curvas do ensaio, gravando-as no sistema;
- ◆ Cortar a injeção do gás redutor e passar nitrogênio para resfriamento do forno;
- ◆ Retirar os pesos do apoio de carga;
- ◆ Após resfriamento do forno, abrir o forno, retirar o cadinho, descarregar a câmara de carga;
- ◆ Abrir a mesa coletora e retirar o material proveniente da fusão da carga metálica.

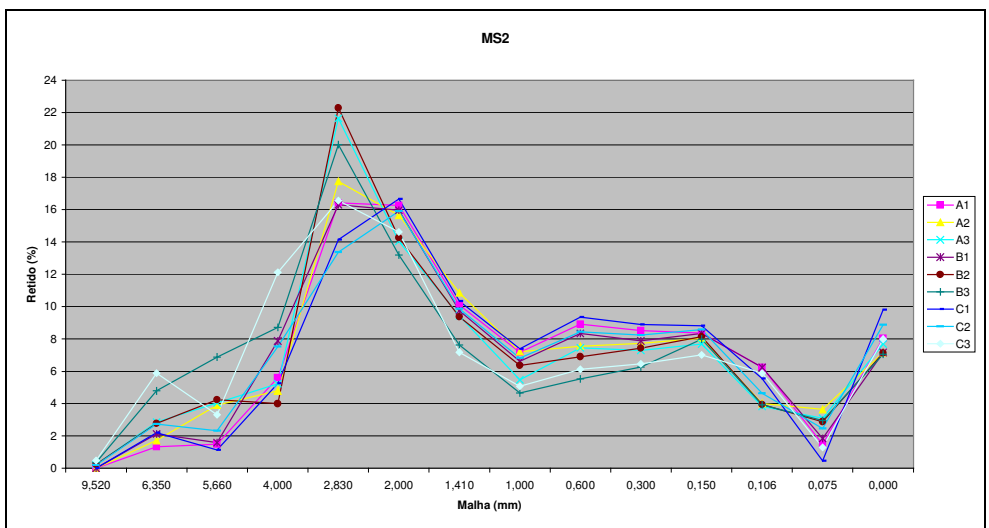
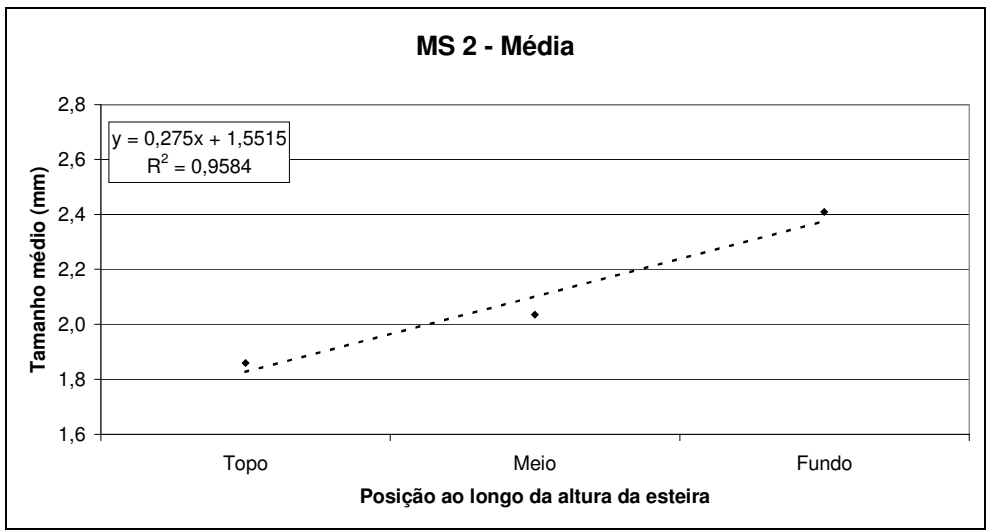
Análise dos Resultados:

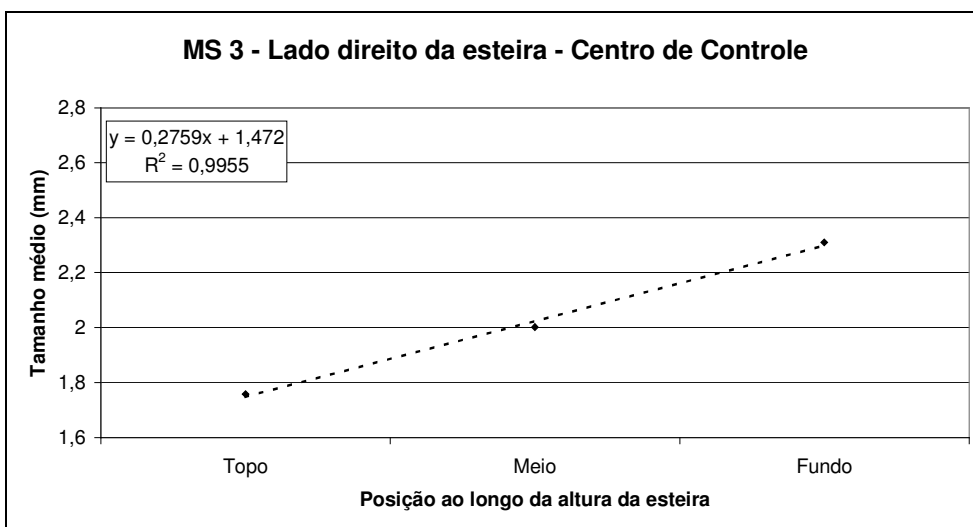
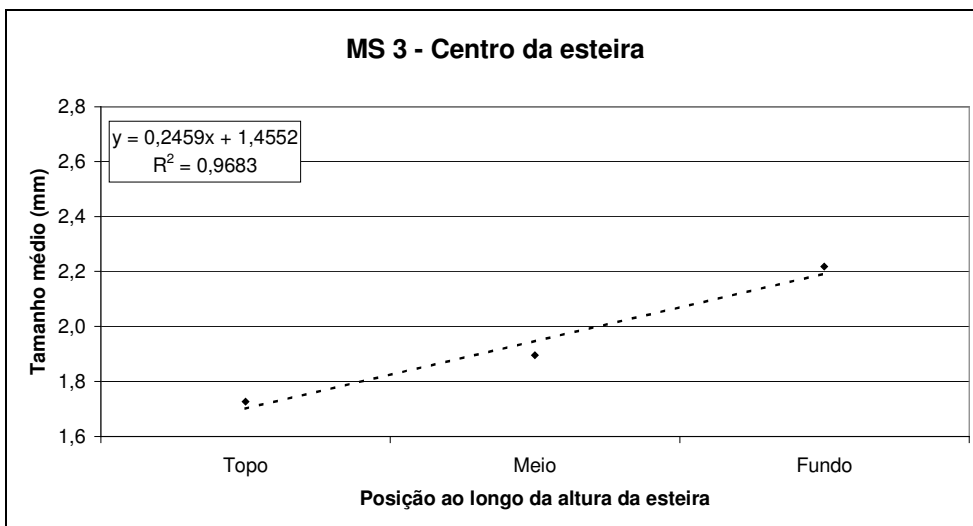
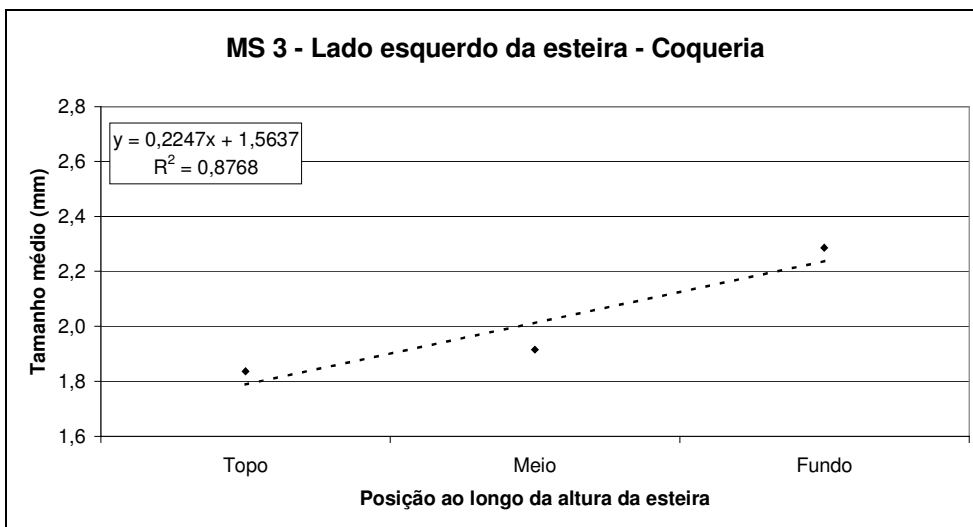
A avaliação das características de amolecimento e fusão das diferentes matérias-primas é feita com base no comportamento de dois parâmetros usualmente medidos durante o ensaio: a contração da amostra (empacotamento do leito) e a variação da perda de pressão do gás que a atravessa. A contração caracteriza o início do amolecimento enquanto que uma elevação mais acentuada da perda de pressão caracteriza o fim do amolecimento e o início da fusão. Após o atingimento da perda de pressão máxima, a temperatura na qual ocorre a queda da perda de pressão é considerada, por alguns, como a temperatura de início de fusão. O fim da fusão é monitorado através das temperaturas nas quais a contração é interrompida e/ou a queda de pressão retorna aos níveis originais. O material que funde, gusa e/ou escória, pode ser amostrado e analisado, para determinação das condições de fusão e formação de escória primária.

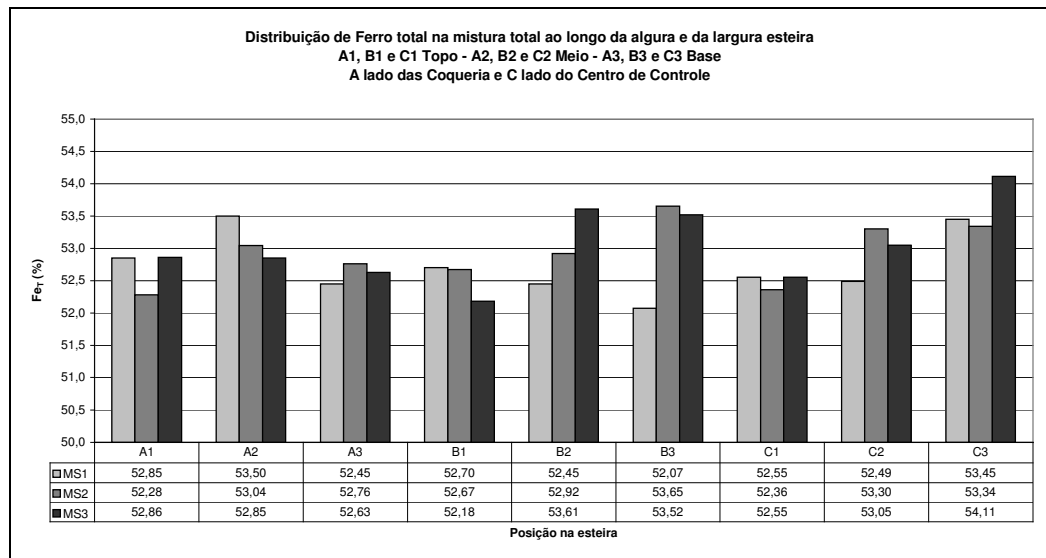
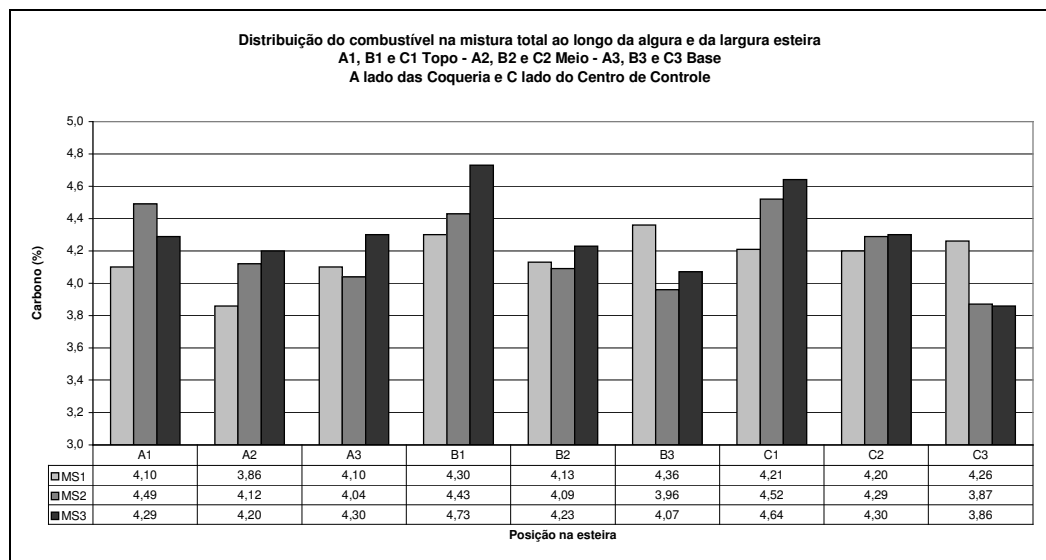
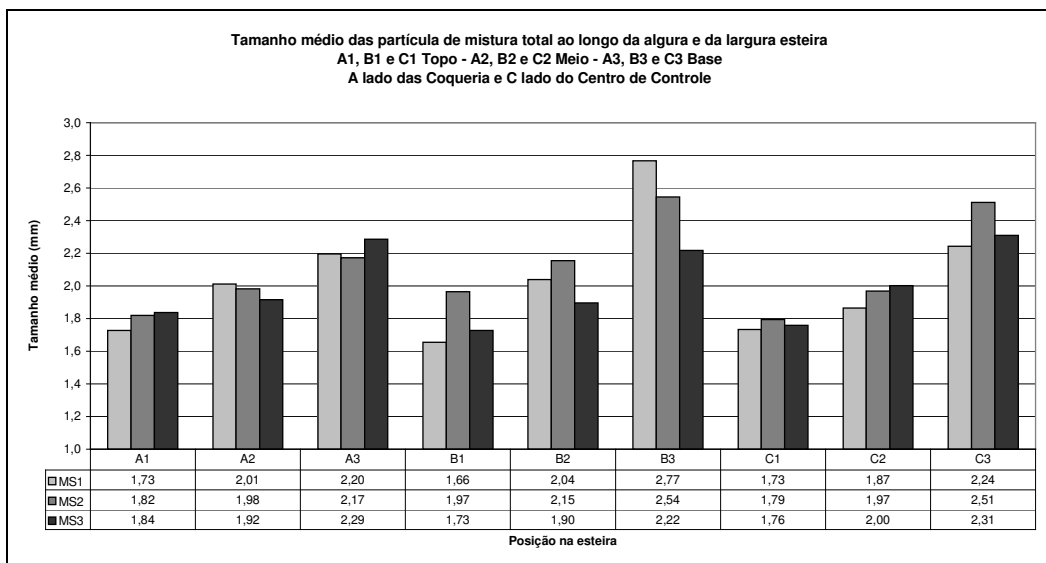
ANEXO A.6 – Caracterização da mistura depositada na esteira a sinterizar das três sinterizações da Usiminas: MS1 - Máquina de sinterizar nº1, MS2 - Máquina de sinterizar nº2 e MS3 - Máquina de sinterizar nº3.

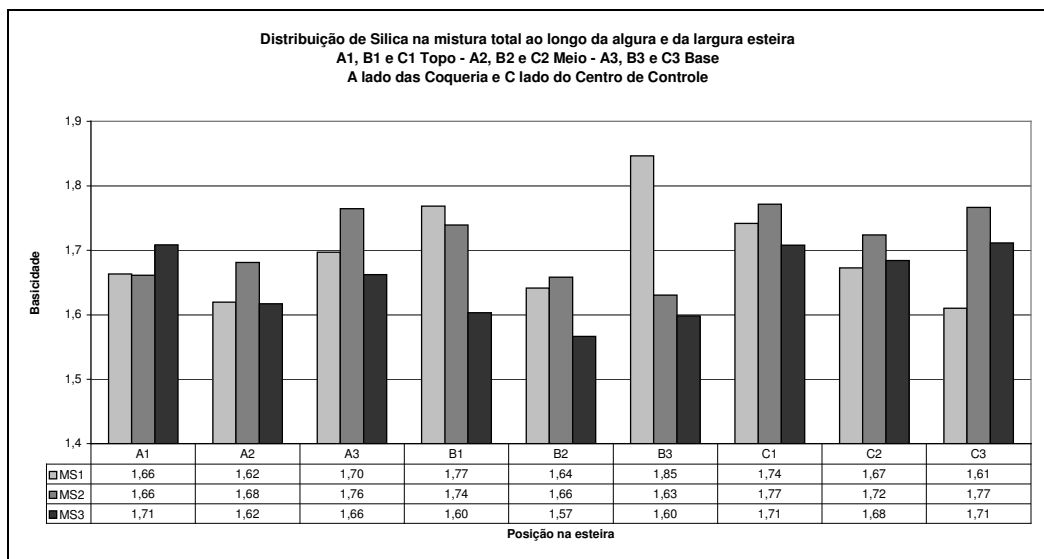
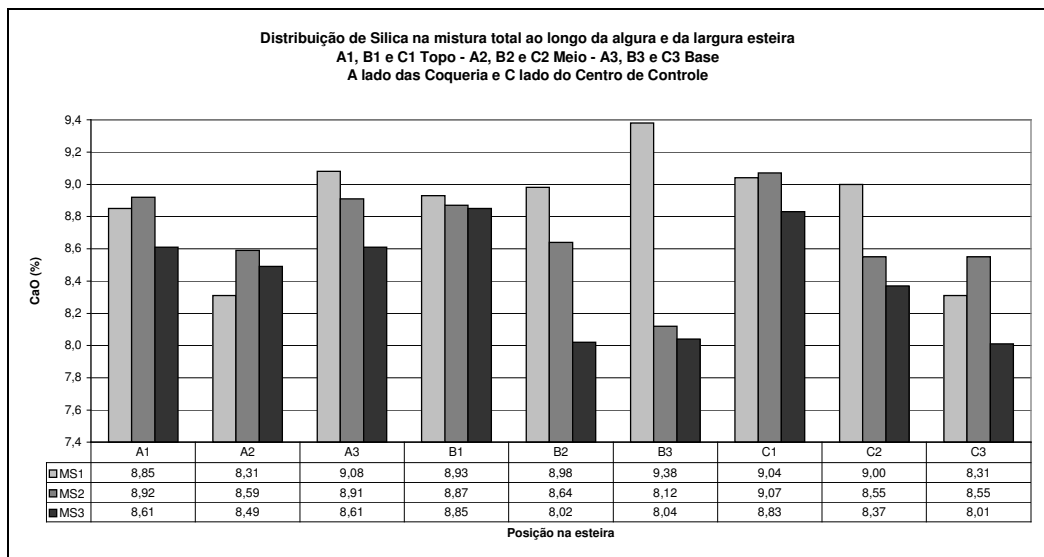
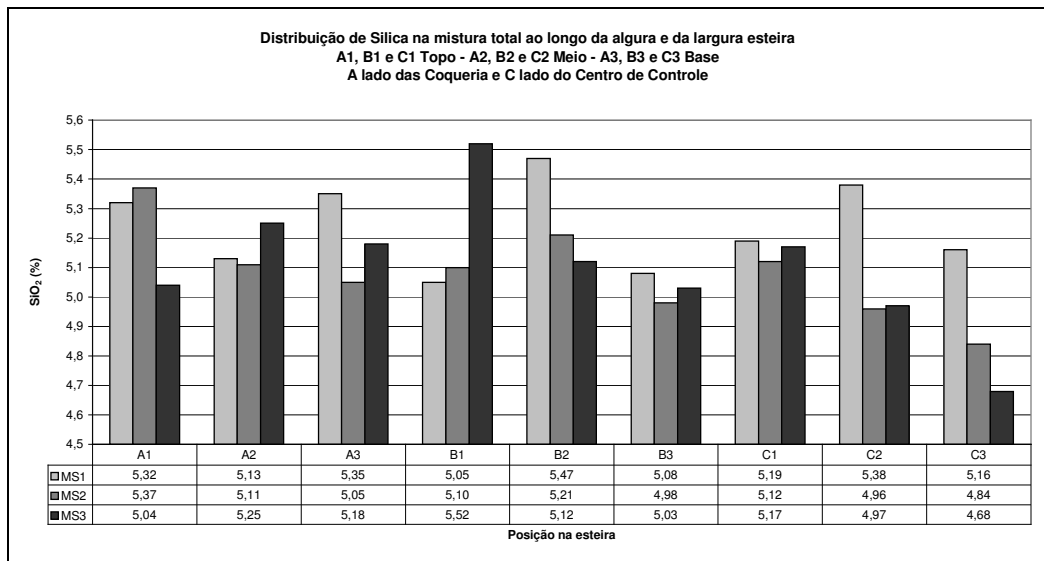












ANEXO A.7 – Caracterização da mistura e do sínter na esteira da sinterização nº3 da Usiminas, produzido com o serpentinito de granulometria normal e grosso (valores em percentual).

Resultados de Análise Química da Mistura - Teor de MgO

A 1	B 1	C 1
Serpentinito Normal - 1,50 Grosso - 1,39	Serpentinito Normal - 1,44 Grosso - 0,96	Serpentinito Normal - 1,44 Grosso - 1,00
A 2	B 2	C 2
Serpentinito Normal - 1,43 Grosso - 1,46	Serpentinito Normal - 1,50 Grosso - 1,38	Serpentinito Normal - 1,41 Grosso - 1,05
A 3	B 3	C 3
Serpentinito Normal - 1,47 Grosso - 1,48	Serpentinito Normal - 1,40 Grosso - 1,56	Serpentinito Normal - 1,32 Grosso - 1,62

Meta para sínter normal => 1,40 % ± 0,05 %

Resultados de Análise Química da Mistura - Teor de SiO₂

A 1	B 1	C 1
Serpentinito Normal - 5,11 Grosso - 4,78	Serpentinito Normal - 5,33 Grosso - 4,17	Serpentinito Normal - 4,64 Grosso - 4,35
A 2	B 2	C 2
Serpentinito Normal - 5,07 Grosso - 4,78	Serpentinito Normal - 4,74 Grosso - 4,51	Serpentinito Normal - 4,96 Grosso - 4,50
A 3	B 3	C 3
Serpentinito Normal - 5,22 Grosso - 4,64	Serpentinito Normal - 4,93 Grosso - 4,72	Serpentinito Normal - 4,54 Grosso - 4,70

Meta para sínter normal => < 4,90 %

Resultados de Análise Química da Mistura - Teor de C

A 1	B 1	C 1
Serpentinito Normal - 4,48 Grosso - 5,04	Serpentinito Normal - 4,62 Grosso - 4,89	Serpentinito Normal - 4,73 Grosso - 4,78
A 2	B 2	C 2
Serpentinito Normal - 4,34 Grosso - 4,71	Serpentinito Normal - 4,76 Grosso - 4,38	Serpentinito Normal - 4,47 Grosso - 4,57
A 3	B 3	C 3
Serpentinito Normal - 4,27 Grosso - 4,70	Serpentinito Normal - 4,05 Grosso - 4,58	Serpentinito Normal - 4,11 Grosso - 4,33

A.7.2 – Sínter na estreira.

Resultados de Análise Química do Sínter - Teor de MgO

A 1	B 1	C 1
Serpentinito Normal - 1,41 Grosso - 1,11	Serpentinito Normal - 1,36 Grosso - 1,03	Serpentinito Normal - 1,41 Grosso - 1,07
A 2	B 2	C 2
Serpentinito Normal - 1,28 Grosso - 1,14	Serpentinito Normal - 1,32 Grosso - 1,25	Serpentinito Normal - 1,28 Grosso - 1,14
A 3	B 3	C 3
Serpentinito Normal - 1,26 Grosso - 1,75	Serpentinito Normal - 1,27 Grosso - 2,01	Serpentinito Normal - 1,23 Grosso - 1,79

Meta para sínter normal => 1,40 % \pm 0,05 %

Resultados de Análise Química do Sínter - Teor de SiO₂

A 1	B 1	C 1
Serpentinito Normal - 4,90 Grosso - 4,46	Serpentinito Normal - 4,87 Grosso - 4,59	Serpentinito Normal - 4,97 Grosso - 4,55
A 2	B 2	C 2
Serpentinito Normal - 4,76 Grosso - 4,50	Serpentinito Normal - 4,81 Grosso - 4,60	Serpentinito Normal - 4,76 Grosso - 4,52
A 3	B 3	C 3
Serpentinito Normal - 5,02 Grosso - 5,20	Serpentinito Normal - 5,13 Grosso - 5,38	Serpentinito Normal - 4,82 Grosso - 5,16

Meta para sínter normal => < 4,90 %

Resultados de Análise Química do Sínter - Basicidade

A 1	B 1	C 1
Serpentinito Normal - 1,77 Grosso - 1,94	Serpentinito Normal - 1,77 Grosso - 1,90	Serpentinito Normal - 1,74 Grosso - 1,87
A 2	B 2	C 2
Serpentinito Normal - 1,80 Grosso - 1,90	Serpentinito Normal - 1,77 Grosso - 1,88	Serpentinito Normal - 1,80 Grosso - 1,88
A 3	B 3	C 3
Serpentinito Normal - 1,76 Grosso - 1,69	Serpentinito Normal - 1,74 Grosso - 1,64	Serpentinito Normal - 1,80 Grosso - 1,68

Meta para sinter normal => 1,80% ± 0,04%

Resultados de Tamanho Médio do Sínter

A 1	B 1	C 1
Serpentinito Normal - 24,06 Grosso - 23,35	Serpentinito Normal - 20,19 Grosso - 29,80	Serpentinito Normal - 26,02 Grosso - 20,34
A 2	B 2	C 2
Serpentinito Normal - 33,47 Grosso - 34,01	Serpentinito Normal - 35,83 Grosso - 30,62	Serpentinito Normal - 34,32 Grosso - 28,86
A 3	B 3	C 3
Serpentinito Normal - 32,55 Grosso - 35,77	Serpentinito Normal - 32,45 Grosso - 32,77	Serpentinito Normal - 34,64 Grosso - 33,47

Resultados de *Shatter Test*

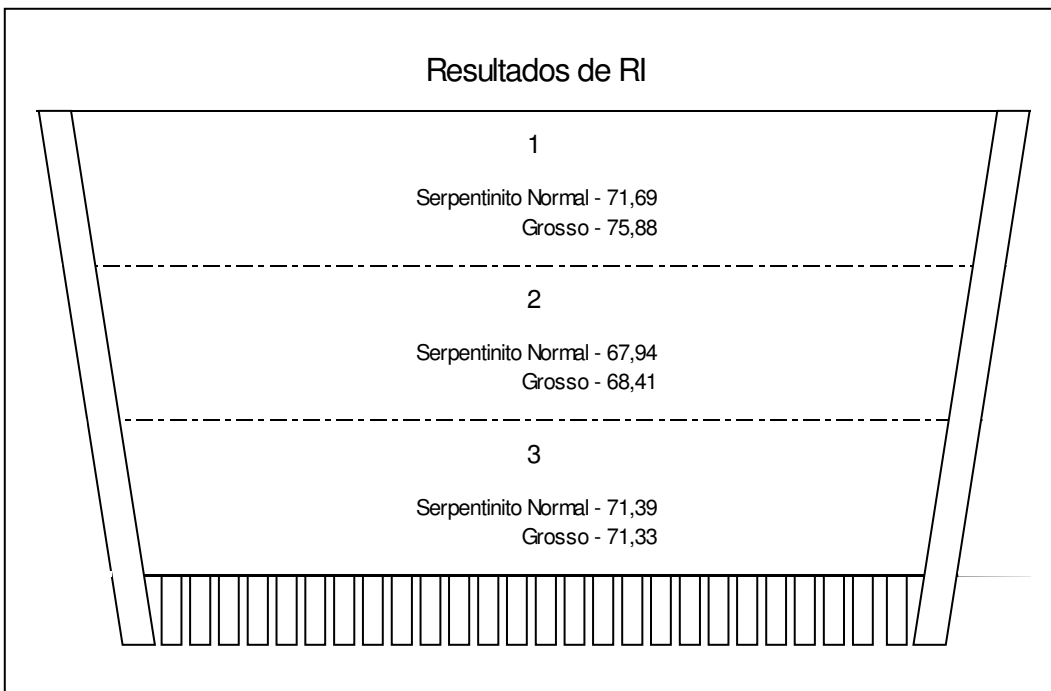
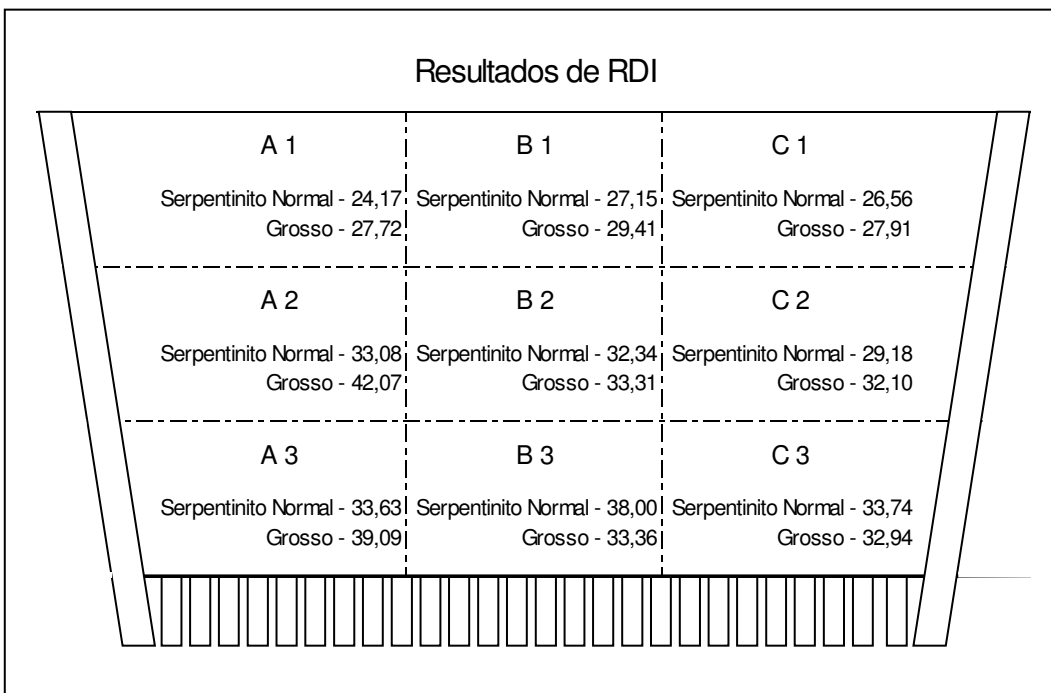
A 1	B 1	C 1
Serpentinito Normal - 85,25 Grosso - 87,00	Serpentinito Normal - 85,50 Grosso - 84,00	Serpentinito Normal - 87,75 Grosso - 84,50
A 2	B 2	C 2
Serpentinito Normal - 95,00 Grosso - 95,50	Serpentinito Normal - 95,75 Grosso - 94,25	Serpentinito Normal - 95,25 Grosso - 94,00
A 3	B 3	C 3
Serpentinito Normal - 94,50 Grosso - 95,75	Serpentinito Normal - 94,25 Grosso - 95,00	Serpentinito Normal - 94,75 Grosso - 94,75

Meta para sínter normal => 89,00 % > 10 mm

Resultados de *Tumbler Test*

A 1	B 1	C 1
Serpentinito Normal - 50,43 Grosso - 54,56	Serpentinito Normal - 55,65 Grosso - 54,78	Serpentinito Normal - 56,30 Grosso - 55,22
A 2	B 2	C 2
Serpentinito Normal - 72,60 Grosso - 75,00	Serpentinito Normal - 73,91 Grosso - 73,48	Serpentinito Normal - 71,95 Grosso - 70,65
A 3	B 3	C 3
Serpentinito Normal - 73,69 Grosso - 70,87	Serpentinito Normal - 71,08 Grosso - 69,56	Serpentinito Normal - 68,69 Grosso - 69,56

Meta para sínter normal => 60,00 % > 6 mm



Resultados de Amolecimento e Fusão

A 1		B 1		C 1	
TA	ΔT_{AF}	TA	ΔT_{AF}	TA	ΔT_{AF}
Serpentinito N. - 1298	321	Serpentinito N. - 1327	289	Serpentinito N. - 1297	313
G. - 1366	242	G. - 1364	245	G. - 1363	288
A 2		B 2		C 2	
TA	ΔT_{AF}	TA	ΔT_{AF}	TA	ΔT_{AF}
Serpentinito N. - 1288	363	Serpentinito N. - 1326	251	Serpentinito N. - 1254	393
G. - 1333	295	G. - 1359	263	G. - 1302	317
A 3		B 3		C 3	
TA	ΔT_{AF}	TA	ΔT_{AF}	TA	ΔT_{AF}
Serpentinito N. - 1314	305	Serpentinito N. - 1411	240	Serpentinito N. - 1429	182
G. - 1345	275	G. - 1349	296	G. - 1288	340

Resultados de Análise de Fases do Sinter - Hematita

A 1		B 1		C 1	
Serpentinito Normal - 9,66	Grosso - 12,20	Serpentinito Normal - 10,10	Grosso - 10,41	Serpentinito Normal - 7,87	Grosso - 14,52
A 2		B 2		C 2	
Serpentinito Normal - 11,21	Grosso - 6,24	Serpentinito Normal - 11,10	Grosso - 9,96	Serpentinito Normal - 12,74	Grosso - 7,44
A 3		B 3		C 3	
Serpentinito Normal - 9,20	Grosso - 8,43	Serpentinito Normal - 10,50	Grosso - 10,32	Serpentinito Normal - 7,80	Grosso - 13,86

Resultados de Análise de Fases do Sínter - Magnetita

A 1	B 1	C 1
Serpentinito Normal - 24,17 Grosso - 14,15	Serpentinito Normal - 22,52 Grosso - 14,29	Serpentinito Normal - 25,28 Grosso - 28,41
A 2	B 2	C 2
Serpentinito Normal - 20,09 Grosso - 15,42	Serpentinito Normal - 26,28 Grosso - 17,27	Serpentinito Normal - 22,63 Grosso - 28,71
A 3	B 3	C 3
Serpentinito Normal - 20,70 Grosso - 13,18	Serpentinito Normal - 21,22 Grosso - 14,46	Serpentinito Normal - 18,53 Grosso - 28,23

Resultados de Análise de Fases do Sínter - Calcioferritas

A 1	B 1	C 1
Serpentinito Normal - 17,40 Grosso - 23,60	Serpentinito Normal - 23,79 Grosso - 19,83	Serpentinito Normal - 19,45 Grosso - 14,83
A 2	B 2	C 2
Serpentinito Normal - 18,90 Grosso - 24,59	Serpentinito Normal - 21,55 Grosso - 21,86	Serpentinito Normal - 23,70 Grosso - 21,26
A 3	B 3	C 3
Serpentinito Normal - 27,36 Grosso - 26,33	Serpentinito Normal - 17,47 Grosso - 18,97	Serpentinito Normal - 23,76 Grosso - 22,40

Resultados de Análise de Fases do Sinter - Silicatos

A 1	B 1	C 1
Serpentinito Normal - 10,75 Grosso - 7,03	Serpentinito Normal - 8,29 Grosso - 8,59	Serpentinito Normal - 13,75 Grosso - 7,17
A 2	B 2	C 2
Serpentinito Normal - 12,31 Grosso - 7,95	Serpentinito Normal - 8,90 Grosso - 8,02	Serpentinito Normal - 8,04 Grosso - 7,70
A 3	B 3	C 3
Serpentinito Normal - 9,42 Grosso - 9,63	Serpentinito Normal - 9,74 Grosso - 6,30	Serpentinito Normal - 9,02 Grosso - 5,69

Resultados de Análise de Fases do Sinter - Poros

A 1	B 1	C 1
Serpentinito Normal - 36,26 Grosso - 41,60	Serpentinito Normal - 33,86 Grosso - 45,64	Serpentinito Normal - 32,12 Grosso - 33,46
A 2	B 2	C 2
Serpentinito Normal - 36,19 Grosso - 44,37	Serpentinito Normal - 28,42 Grosso - 40,92	Serpentinito Normal - 31,60 Grosso - 33,55
A 3	B 3	C 3
Serpentinito Normal - 31,68 Grosso - 41,09	Serpentinito Normal - 39,52 Grosso - 48,75	Serpentinito Normal - 39,61 Grosso - 28,45