

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

**Influência das Características do Itabirito Concentrado no
Desempenho do Processo de Sinterização**

Autor: Lindaura de Souza Cândido d'Avila

Orientador: Prof. Maurício Covcevich Bagatini, Dr.

Dezembro/2015

Lindaura de Souza Cândido d'Ávila

Influência das características do itabirito concentrado no desempenho do
processo de sinterização

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa.

Orientador: Prof. Maurício Covcevich Bagatini, Dr.

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
2015

Aos meus filhos: Gabriel e Vítor, que sempre busquem enfrentar todos os obstáculos com serenidade e determinação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que participaram deste trabalho em todos os momentos de sua duração. De forma especial, gostaria de prestar os meus sinceros agradecimentos:

- A GERDAU USINA OURO BRANCO e a Gerência de Sinterização, pela oportunidade de crescimento profissional, apoio e confiança depositada a realização deste trabalho;
- Ao colega de trabalho Railson Nogueira de Azevedo pelo entusiasmo e dedicação à execução do trabalho, bem como pelas discussões dos dados experimentais, incentivo e amizade, sem dúvida um dos profissionais mais completos na área de sinterização;
- Aos colegas de trabalho da Gerência de Sinterização: José Sérgio Santana de Castro, Robert Nogueira de Azevedo, Felipe Alencar Teixeira, Mauricio Maia Braga Hashimoto, Magno Fernandes Reis Silva e Paulo Roberto Ferreira de Oliveira, pelo apoio, amizade, disponibilidade para a realização de estudos e preparação deste trabalho;
- Aos colaboradores da Unidade Piloto de Sinterização da GERDAU USINA OURO BRANCO: Geraldo de Oliveira Gonçalves, Ramon Serafim Reis e Pedro Lúcio Gonçalves pelo excelente trabalho na preparação e realização dos testes necessários à realização deste estudo;
- Ao prof. Dr. Maurício Covcevich Bagatini, pela orientação, apoio, dedicação, discussão e acompanhamento deste trabalho;
- Aos meus pais, irmãos, pelo exemplo de vida, honestidade e vontade, pelo apoio e incentivo sempre dados ao longo de minha vida;
- Aos meus filhos, Gabriel e Vítor e ao meu marido, Matheus, pela compreensão e dedicação que apoiaram o meu trabalho, foram motivações para seguir adiante, cuja atenção, paciência e confiança foram fundamentais;
- A CAPES-PROEX, CNPq, FAPEMIG pelo apoio realização do trabalho;
- Por fim a todos que de alguma forma contribuíram para o sucesso do trabalho.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo geral	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Minérios de Ferro	4
3.2. Características do Minério de Ferro para Consumo na Sinterização	7
3.2.1. Características Químicas.....	9
3.2.2. Características Físicas	11
3.3. Fundentes para Sinterização.....	17
3.4. Combustíveis para Sinterização	19
3.5. Processo de Sinterização	20
3.5.1. Definição e Conceitos.....	20
3.5.2. Micropelotização da Mistura a Sinterizar	23
3.5.2.1. Homogeneização e Umidificação da Mistura a Sinterizar	23
3.5.2.2. A Influência e o Controle do Misturamento na Formação das Micropelotas.....	26
3.5.2.3. A Influência de um Agente Aglomerante na Formação das Micropelotas	28
3.6. Mecanismos de Sinterização.....	29
3.6.1. Tratamento Mecânico do Sínter.....	33
3.7. Qualidade do Sínter Produto	34
3.8. Estudos em Unidade Piloto de Sinterização	38
4. MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1. Amostras de Minérios de Ferro	40
4.2. Caracterização dos Minérios de Ferro	41
4.3. Testes em Sinterização Piloto	47
4.4. Testes de Avaliação da Qualidade do Sínter	50

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1. Caracterização dos Minérios de Ferro.....	53
5.2. Testes de Sinterização em Escala Piloto.....	59
5.3. Qualidade do Sínter Produzido em Escala Piloto	61
6. CONCLUSÕES	71
7. RELEVÂNCIA	74
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
BIBLIOGRAFIA	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Distribuição granulométrica ideal para a mistura de minérios (curva de <i>Astier</i>).....	12
Figura 3.2 – Poder de aglomeração a frio de materiais diversos em função do tempo de misturamento	15
Figura 3.3 – Combinação de minérios diferentes em função da proporção aderente/nucleante	15
Figura 3.4: Fluxograma do processo de sinterização	21
Figura 3.5 – Equipamento de homogeneização e micropelotização da planta de sinterização	24
Figura 3.6 – Influência da micropelotização na distribuição granulométrica da mistura	25
Figura 3.7 – Relação permeabilidade versus umidade da mistura a sinterizar	26
Figura 3.8 – Movimento das partículas no misturador	27
Figura 3.9 - Influência da participação de cal na mistura em relação à produtividade e tempo de sinterização.....	28
Figura 3.10 – Esquema de troca de calor no leito de sinterização.....	30
Figura 3.11 – Corte longitudinal de um leito de sinterização em um instante qualquer.....	32
Figura 3.12 – Corte transversal e perfil térmico de um leito de sinterização em um instante qualquer	33
Figura 4.1 - Fluxograma das etapas de preparação da amostra do minério de ferro hematítico friável	40
Figura 4.2 - Fluxograma das etapas de preparação da amostra do minério de ferro itabirítico friável.....	41
Figura 4.3 - Medida do ângulo de repouso dos minérios de ferro.....	45
Figura 4.4 – Foto do equipamento microscópio óptico utilizado para realização das análises de microscopia	46
Figura 4.5 – Fotos dos equipamentos de uma planta de sinterização em escala piloto	50
Figura 5.1 – Fotomicrografias do minério de ferro itabirítico (a, b, c e d)	55
Figura 5.2 – Fotomicrografias do minério de ferro hematítico (a, b, c e d).....	57

Figura 5.3 – Capacidade de umidificação (capilaridade) (a), porosidade (b), aglomeração a frio obtida através do índice de granulação (c) e medida do ângulo de repouso (d) para os minérios de ferro avaliados	58
Figura 5.4 – Principais parâmetros de desempenho obtidos nos ensaios com misturas utilizando os minérios de ferro individualmente	61
Figura 5.5 – Principais parâmetros de desempenho obtidos nos ensaios com misturas com variações na proporção do minério de ferro itabirítico	61
Figura 5.6 – Distribuição granulométrica dos sínteres Produzidos em unidade piloto de sinterização.....	63
Figura 5.7 – Teste de tambor (fração maior que 6,35mm) (a) e teste de queda (fração maior que 10,0mm) (b) para os sínteres de minérios de ferro avaliados	64
Figura 5.8 – Ensaio de redutibilidade (RI) - Norma ISO7215 para os minérios de ferro avaliados (a) e ensaios RDI – Norma ISO4696-2 para os minérios de ferro avaliados (b).	65
Figura 5.9 – Análise mineralógica quantitativa das fases dos sínteres produzidos a partir dos minérios de ferro hematítico e itabirítico friável.....	66
Figura 5.10 – Análise mineralógica qualitativa do sínter produzido a partir do minério de ferro hematítico friável. FC - Ferrito de Cálcio, HS - Hematita Secundária, HP - Hematita Primária, MA – Magnetita e PO – Poros. Imagem com aumento de 100x.	68
Figura 5.11 – Análise mineralógica do sínter produzido a partir do minério de ferro itabirítico friável. FC - Ferrito de Cálcio, HS - Hematita Secundária, MA – Magnetita, HP – Hematita Primária, QZ - Quartzo e PO – Poros. Imagem com aumento de 100x.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – 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	18
Tabela 4.1: Composição das misturas de minérios	47
Tabela 4.2: Características químicas objetivadas para o sinter e principais parâmetros de processo	48
Tabela 4.3: Porcentagem das matérias-primas que compõem cada uma das misturas (porcentagem na mistura total)	49
Tabela 5.1: Resultados de análises químicas dos minérios de ferro.....	53
Tabela 5.2: Classificação mineralógica do minério de ferro itabirítico.....	54
Tabela 5.3: Classificação mineralógica do minério de ferro hematítico	56
Tabela 5.4: Resultados de análises granulométricas dos minérios de ferro.....	57
Tabela 5.5: Qualidade química de cada sinter produto	62
Tabela 5.6: Qualidade granulométrica de cada sinter produto	63

RESUMO

Nos últimos anos as jazidas de minérios de ferro vêm demonstrando fortes alterações no perfil do ROM (*Run of Mine*) que alimenta as usinas de beneficiamento. A relação hematita/itabirito (HE/IT) nos ROMs, ao longo do tempo vem se tornando cada vez menor, sendo que esta redução é resultado direto de um ROM mais itabirítico se comparado à última década. A inversão desta relação é uma tendência natural das reservas ou jazidas com a evolução da lavra, e com aumento da participação dos itabiritos na matriz de minérios de ferro que são alimentadas nas usinas de beneficiamento, torna-se cada vez mais importante conhecer o comportamento desses minérios visando manter a produtividade das plantas de sinterização.

Dentro desta realidade de elevação do uso de minério de ferro itabirítico, este trabalho teve como objetivo investigar as características e o desempenho em escala piloto de sinterização desse minério de ferro. Inicialmente, foi realizada a caracterização dos minérios de ferro hematítico e itabirítico oriundos do Quadrilátero Ferrífero. Para caracterização física dos minérios de ferro foram realizados ensaios de avaliação do poder de aglomeração a frio, capacidade de umidificação pelo efeito da pressão capilar dos minérios de ferro, porosidade por meio de picnômetro, determinação do ângulo de repouso dos minérios de ferro e análises granulométricas. Em seguida, foram testadas em escala piloto misturas de minério de ferro com proporções variadas de minério de ferro hematítico e itabirítico. Foram avaliados os sínteres gerados a partir das misturas testadas quanto à qualidade química, física e metalúrgica. A partir dos resultados de produtividade e de qualidade do sínter obtido foi possível avaliar o efeito do minério de ferro itabirítico na mistura de sinterização. Tais resultados indicam diferentes desempenhos desses parâmetros na unidade piloto de sinterização.

Quanto à caracterização dos minérios de ferro estudados, estes apresentam distinções químicas e mineralógicas. O minério de ferro itabirítico, apresentou teores mais elevados de contaminantes, principalmente sílica, que foi de 6,41%, enquanto que o hematítico apresentou apenas 0,92%. No minério de ferro hematítico, observou-se que a hematita lobular é a fase mineral predominante, enquanto que no minério itabirítico, a principal fase encontrada é a magnetita. Também foram observadas diferenças significativas quanto às características físicas desses minérios de ferro. Comparativamente ao minério de ferro hematítico, o minério de ferro itabirítico

apresentou maiores valores de porosidade, o que deve explicar o seu menor desempenho de aglomeração a frio e maior capacidade de umidificação nas condições testadas. Observou-se também que o desempenho do processo de sinterização foi influenciado pelas características intrínsecas dos minérios, tais como, mineralogia e características físicas. Os melhores níveis de produtividade obtidos na sinterização piloto foram com o minério de ferro hematítico.

Palavras-chave: minérios de ferro, aglomeração a frio, sinterização, produtividade, qualidade do sínter.

ABSTRACT

In recent years the iron ore deposits have identified strong changes in the profile of ROM (Run of Mine) that feeds the processing plants. The relationship hematite/Itabirite (HE/IT) in ROMs, over time has become smaller and smaller, and this reduction is a direct result of a more itabiritic ROM compared to the last decade. The reversal of this relationship is a natural tendency of reserves or deposits with the evolution of mining, and increased participation of itabirite in the matrix of iron ores which are fed in the beneficiation plants, it becomes increasingly important to know the behavior of these iron ore to maintain the productivity of the Sintering Plants.

Within this reality of elevation of the use of iron ore itabiritic, this study aimed to investigate the characteristics and performance in sintering pilot scale of that iron ore. It was initially characterized the hematite iron ore and itabiritic coming from the Cuadrilátero Ferrífero. For physical characterization of iron ore, tests were carried out to evaluate cold agglomeration power, ability to humidification by the effect of capillary pressure of iron ore, porosity through specific-gravity bottle, determining the angle of repose of iron ore and grain size analysis. Then iron ore mixtures were tested in pilot scale with varying proportions of hematite and itabirite ore. The sinters generated from the mixtures were tested for chemical, physical and metallurgical quality. From the productivity and quality sinter results obtained it was possible to evaluate the effect of the itabiritic ore on the sintering mix. These results indicate different performance of these parameters in pilot sinter plant.

The studied iron ores have chemical and mineralogical distinctions regarding their characterization. The itabiritic iron ore presented a higher content of contaminants, especially silica, which was 6.41%, whereas the hematite presented only 0.92%. In hematite iron ore, it was observed that hematite lobular is the predominant mineral phase, while in itabiritic iron ore, the main phase found is magnetite. Significant differences were also observed related to the physical characteristics of these ores. Compared to hematite iron ore, itabiritic iron ore presented higher porosity values, which should explain their less cold agglomeration performance and greater capacity for humidification in the tested conditions. It was also observed that the performance of the sintering process was influenced by the intrinsic characteristics of ores, such as,

mineralogical, and physical characteristics. The best productivity levels were obtained in the pilot sintering plant with hematite iron ore.

Keywords: iron ores, cold agglomeration, sintering, productivity, sinter quality.

1. INTRODUÇÃO

No Quadrilátero Ferrífero estão localizadas grandes reservas de minério de ferro. Estes podem ser classificados em dois grupos principais: os itabiríticos, minérios de mais baixo teor de ferro, mais heterogêneos, e os hematíticos de alto teor, quimicamente mais homogêneos, ricos em óxidos de ferro.

A extração de minérios que antes era prioritariamente de minérios hematíticos compactos mudou, dando lugar também para as hematitas friáveis, itabiritos ricos e em um passo seguinte para os itabiritos pobres e hidratados. Com o decréscimo das minas de minérios hematíticos (mudando de 100% de hematita para a participação significativa do itabirito) e maiores restrições ambientais, ficou claro que, a partir da última década a especificação de finos de minérios de ferro para sinterização até então praticada não deve ser a mesma.

O minério itabirito é um produto de alteração, por intemperismo, da rocha de mesmo nome. O intemperismo é um processo que atua tanto mais intensamente, quanto mais próximo à superfície topográfica. Ao contrário do que ocorre com minérios de alto teor (hematita), o *run-of-mine* dos itabiritos não produz massas significativas acima de 8,0mm.

A qualidade química e física dos minérios de ferro vem diminuindo ao longo do tempo, com os minérios cada vez mais finos, com menores teores de ferro e conseqüentemente mais contaminantes. A relação entre a fração maior que 1,0mm e a fração menor que 0,149mm das misturas de minério de ferro tem se tornado cada vez menor, sendo esta redução o resultado da utilização de minérios de ferro concentrados como corretivos químicos dos teores de SiO_2 e Al_2O_3 das misturas a sinterizar. Tal fato tem causado perda de produtividade das máquinas de sinterização pela perda de permeabilidade no leito de sinterização.

Neste cenário, o que se tem presenciado é a perda de rendimento e de produtividade, com conseqüente aumento dos custos nos processos de produção de gusa, já que grande parte dos equipamentos foi projetada para outra realidade de qualidade química, granulométrica e metalúrgica de minérios de ferro brasileiro.

A produção de sinteres 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. No entanto, a especificação química e granulométrica dos minérios de ferro não é suficiente para explicar 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 de ferro para uso na sinterização.

Neste contexto de deteriorização da qualidade química e granulométrica e consequente elevação do uso de minério de ferro itabirítico, estudos e investimentos vêm sendo realizados na tentativa de manter o desempenho operacional das plantas de sinterização, porém ainda com pouco sucesso. Este trabalho buscou investigar as características e o desempenho em escala piloto de sinterização do minério de ferro itabirítico.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar as características do minério de ferro itabirítico concentrado com vistas a sua utilização no processo de sinterização bem como verificar seu desempenho nesse tipo de processo em escala piloto.

2.2. Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo global do trabalho, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- Caracterização química, granulométrica, física, mineralógica e microestrutural dos minérios de ferro;
- Avaliação do poder de aglomeração a frio dos minérios de ferro;
- Teste de sinterabilidade em planta piloto com minérios de ferro individuais e misturas;
- Avaliação da qualidade do sínteres produzidos em planta piloto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Minérios de Ferro

Os minérios de ferro que apresentam interesse econômico para a siderurgia estão, de modo geral, na forma oxidada, sendo os mais utilizados a hematita e magnetita.

- Hematita: é o tipo mais comum de minério de ferro, constituído essencialmente pelo óxido Fe_2O_3 (trióxido). Apresenta um teor nominal de 69,5% de ferro contido, e na prática o teor varia de 45% a 68% devido à presença de ganga (impurezas). É um mineral muito comum, possui brilho metálico e coloração preta, cinza, marrom, marrom avermelhado ou vermelho (Costa, 2013).
- Magnetita - Constituída essencialmente pelo óxido de ferro cuja fórmula é Fe_3O_4 (peróxido). Apresenta um teor nominal de 72,4% de ferro, sendo que o seu teor real varia de 50% a 70%. É um material de cor cinza escuro e apresenta propriedades magnéticas, o que facilita a sua concentração nas operações de beneficiamento de minérios de ferro (Costa, 2013).

O Quadrilátero Ferrífero representa uma grande porção do Pré-Cambriano brasileiro, devido às suas riquezas minerais. Trata-se de uma importante província mineral, onde se localiza uma das mais importantes áreas produtoras de minérios de ferro do mundo. Estende-se por uma área aproximada de 7.000km², na porção central do Estado de Minas Gerais. No Quadrilátero Ferrífero estão localizadas grandes reservas de minério de ferro. Estes podem ser classificados em dois grupos principais: os itabiríticos (minérios de mais baixo teor de ferro), mais heterogêneos e contendo óxidos e hidróxidos de ferro, e os hematíticos de alto teor, quimicamente mais homogêneos e ricos em óxidos de ferro (Rosière, 1983). Ambos compõem o *Run of Mine* (ROM), minério lavrado direcionado para o primeiro estágio de cominuição, em que são utilizados britadores de mandíbulas (Costa, 2013).

As operações na Mina Cauê tiveram início na década de 60 do século XX e nos últimos anos se vem identificando fortes alterações no perfil do ROM que alimenta as usinas de beneficiamento (Padula, 2009).

Em função das características dos minérios de ferro, muitos estudos foram feitos para implantação de plantas de beneficiamento visando ao atendimento das especificações químicas e granulométricas para consumo na usina. Esses estudos frequentemente esbarram na quantidade excessiva de finos ($< 0,149\text{mm}$) que foram, e serão gerados, e no conseqüente investimento necessário para o tratamento e posterior utilização desses finos nos processos siderúrgicos.

O minério de ferro (*sinter feed* e *pellet feed*) é composto basicamente de um mix de diferentes tipologias de hematita e itabirito (Davila, 2013). Segundo Davila (2012) as tipologias de hematita e itabiritos são classificadas em um contexto estrutural conforme descrito abaixo:

Hematita Compacta: os minérios compactos da porção do Sinclinal Moeda do Quadrilátero Ferrífero são produtos de processos mineralizadores hidrotermais que atuaram sobre as formações ferríferas, sendo constituídos predominantemente de magnetita oxidada/martitzada (minério martítico). A martita ocorre como pseudomórficos de cristais individuais ou agregados maciços com relictos de magnetita, podendo constituir quase 90% do minério. A martita desenvolve-se ao longo dos planos cristalográficos da magnetita e de forma irregular das bordas para o centro. O minério pode apresentar-se também bastante poroso com elevado proporção de espaços vazios entre os cristais de hematita (Rosière, 1983).

A hematita compacta é uma rocha dura, às vezes hidratada e posiciona-se em horizontes estratigráficos bem definidos, acima de xistos de origem vulcânica. Seu contato de topo pode ocorrer com as variedades de hematitas friável e/ou manganésifera (Davila, 2012).

Hematita Friável: os minérios friáveis são produtos do enriquecimento parcial da formação ferrífera por processos hidrotermais e pela atuação recorrente do intemperismo, com lixiviação dos minerais de ganga (carbonato e quartzo). O minério friável é constituído de hematita, alguma martita, além de especularita e cristais lamelares intersticiais (Rosière, 1983).

A hematita friável, de cor cinza-azulada e bandamento milimétrico, exibem passagens para hematita compacta e argilominerais. Seu contato basal ocorre com itabirito especularítico friável e o de topo, com hematita manganésifera (Rosière, 1983).

Hematita Manganésifera/Filito Hematítico Manganésífero: rocha friável, argilosa, coloração marrom escura a preto, magnetismo fraco a inexistente, rico em óxido de manganês, material cisalhado e dobrado com formação de fragmentos de hematita semi-compacta e também com estrutura em lápis, observa-se ainda a intercalação com itabirito rico manganésífero friável. Composição: óxido de ferro (hematita, martita, magnetita), óxido de manganês, quartzo, argilominerais e hidróxido de ferro. Seu produto de alteração possui coloração amarelada com eventuais borrões pretos causados pelo manganês (Davila, 2012).

Itabirito Especularítico: os itabiritos são metamórficos, variando de hidratados a não hidratados. Os itabiritos especularíticos estão restritos a zonas tectonicamente mais deformadas, onde a martitização está relacionada a processos de recristalização, gerando principalmente hematita lamelar e lobular, ambas associadas a finos cristais de magnetita, elevando os teores de FeO, e se caracterizam por apresentarem a hematita especularítica (Costa, 2013).

Itabirito Martítico-Hematítico-Goethítico: O processo de martitização é predominante e em sua grande maioria esta relacionada a processos de oxidação da magnetita, mas também ocorrem processos de recristalização devido à deformação superimposta, porém, em menor escala e restrita tão somente as zonas mais deformadas dos itabiritos. Nestas zonas ocorre a predominância de hematita lamelar e lobular. Os itabiritos apresentam a hematita martítica como mineral minério, tendo quantidades de goethita, hematita e ainda, magnetita (Davila, 2012).

Itabirito Dolomítico: são constituídos geralmente por bandas de dolomita ferrosa, quartzo, óxidos de ferro, podendo apresentar calcita, clorita e anfibólios. Este tipo de dolomitos possuem bandas claras de carbonato e escuras de óxidos de ferro que devem ser igualmente consideradas como formações ferríferas dolomíticas. Apresentam como componentes mineralógicos principais: martita, hematitas, e como componentes acessórios: calcita, grunerita, cummingtonita, clorita, stilpnomelana, biotita, tremolita, actinolita, quartzo, sulfetos e pirofilita. O litotipo é caracterizado por

valores médios de CaO de 2,09%, mas com teores máximos de 16,98% e/ou teores médios de MgO de 3,41%, que atingem o valor máximo de 24,9%. Para a perda ao fogo o valor máximo pode chegar a 22,65%, mas possui média de 3,5%. A coloração é marcada por tons rosados e avermelhados em contraste com a cor cinza do minério de ferro (Costa, 2013).

Para caracterização dos minérios de ferro, as informações mais frequentemente obtidas são a composição mineralógica, os tipos morfológicos e a granulação dos cristais de óxidos/hidróxidos de ferro. Técnicas consagradas como microscopia ótica, microscopia eletrônica e difração de raios-X, procuram exprimir de maneira descritiva os aspectos decorrentes de evolução geológica ou de feições geradas durante o processo de beneficiamento (Goldring *et al.*, 1989). Costa (2013) descreve que na fase de caracterização tecnológica de matérias-primas minerais, análises mineralógicas constituem-se um recurso essencial na identificação dos constituintes e determinação de suas propriedades. As técnicas de análise que possibilitam a quantificação das espécies minerais, viabilizando a determinação da gênese mineral e do grau de liberação do mineral útil, são de grande importância.

Além da composição mineralógica, os estudos de caracterização microestrutural contemplam os aspectos texturais dos minérios, obtidos também por microscopia ótica. Neste caso, o objeto de interesse são os próprios cristais de óxidos/hidróxidos de ferro avaliados de acordo com a sua morfologia e seu tamanho. Entende-se por morfologia a forma geométrica de um cristal único, geralmente de hematita, que constitui o principal mineral na maioria dos minérios. As partículas (ou grãos) presentes em amostras de granulados ou de *sínter feed* são compostos por vários cristais, enquanto que nas frações mais finas de *pellet feed* predominam cristais individualizados que foram desagregados ou fragmentados a partir de partículas mais grossas (Goldring *et al.*, 1989).

3.2. Características do Minério de Ferro para Consumo na Sinterização

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 um ou mais minérios compõem esta mistura (Goldring *et al.*, 1989).

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 de ferro, apesar de extremamente importantes, ainda hoje são pouco exploradas, sendo também pouco consideradas na escolha de minérios de ferro para uso na sinterização (Coelho *et al.*, 2000).

Quando se busca alta produtividade nos processos de sinterização, buscam-se alternativas para que variáveis dos processos sejam manipuladas de modo a se atingir um conjunto de fatores, tanto em termos operacionais como em termos da qualidade das matérias-primas, para que sempre haja melhoria contínua nos níveis de produção (Davila, 2012).

Relativamente à qualidade das matérias-primas e insumos usados para produção de sínteres de alta qualidade, podemos afirmar que a distribuição granulométrica dos minérios e fundentes constituintes da mistura, a reatividade da cal, a granulometria do coque, ou de outros combustíveis alternativos quando do seu uso, influenciam fortemente o processo. E, por último, tem-se a caracterização microestrutural com ênfase para uma classificação do ponto de vista metalúrgico e não mais geológico dos minérios de ferro, que também tem demonstrado grande influência no processo de redução de minérios de ferro.

Segundo Goldring *et al.* (1989), a produtividade na sinterização está ligada às características inerentes ao minério de ferro, sendo que esta produtividade está muito ligada à consistência, especialmente à micropelotização, reatividade dos fundentes e redutibilidade intrínseca dos minérios de ferro. Da mesma forma, uma classificação proposta por este autor, leva em conta características como:

- A natureza mineralógica dos minérios de ferro;
- O processo de beneficiamento e homogeneização do minério de ferro.

Este tipo de classificação é comumente adotado nas minerações como forma de planejamento para a lavra, evitando grandes variações no que diz respeito a características químicas e mineralógicas.

Outros autores ressaltam que a estabilidade dos processos produtivos não depende exclusivamente de procedimentos operacionais, sendo que a mineralogia e a gênese das matérias-primas influenciam fortemente aspectos como a produtividade nos processos de sinterização (Coelho *et al.*, 2000). Segundo estes autores, a classificação de diversos minérios brasileiros tem como foco a mineralogia e a gênese destes minérios, classificando-os como sendo hematíticos e hidratados. Sendo uma subclassificação em: hematíticos martíticos, hematíticos especularíticos, hematíticos microcristalinos e jaspilitos. Esta classificação busca diretamente uma ligação entre geologia, lavra, processamento mineral e metalurgia (siderurgia), que é o que realmente importa em termos de aplicação dos produtos das minerações.

Estas classificações e subclassificações poderiam sim estar mais correlacionadas com as propriedades finais necessárias ao uso do sínter no alto-forno, tornando mais palpável o uso na siderurgia de conceitos como martíticos, especularíticos, etc. Uma correlação entre estas classificações e o comportamento tanto na mistura quanto no processo de sinterização podem melhorar a visão do metalurgista auxiliando na previsibilidade das propriedades essenciais ao uso do sínter.

3.2.1. Características Químicas

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 ferrífera, da natureza e do volume de escória produzida na fabricação do ferro gusa e, principalmente, da qualidade do sínter. Entretanto, especificada a composição química para um dado minério de ferro, 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 de ferro ricos, com reduzidos teores de enxofre, titânio e álcalis, resumem-se aos teores de alumina, sílica e fósforo (Januzzi, 1999).

O minério hidratado, devido às suas boas características aglomerantes e alta fusibilidade, permite, quando em proporções adequadas, otimizar a produtividade de misturas de minérios de ferro 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. Essas 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 (baixa resistência mecânica) (Azevedo *et al.*, 2013).

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 de minérios através do uso de fundentes específicos. Procura-se também evitar a utilização de minérios de ferro onde o SiO_2 esteja concentrado nas frações mais grossas (maior que 1,0mm), uma vez que, neste caso, nem todo ele participará das reações de sinterização, diminuindo o volume "real" de escória e fragilizando o sinter (Davila, 2012).

A principal restrição da alumina (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 (menor que 0,149mm) 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 de ferro, pode ser explicada pela sua participação mais intensa nas reações de sinterização, dissolvendo-se na rede da hematita secundária e tensionando a sua

estrutura. A Al_2O_3 presente nas frações mais grossas praticamente não participa das reações de sinterização. Fato semelhante ocorre com a dissolução do óxido de titânio (TiO_2) na rede da hematita. O TiO_2 também apresenta o comportamento semelhante ao da Al_2O_3 quanto ao índice de degradação sob redução (RDI).

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 (Vieira *et al.*, 2003).

3.2.2. Características Físicas

As principais características físicas dos minérios de ferro 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 são atribuídas pouca importância devido à falta de informações a respeito e de métodos eficazes de avaliação, influenciam a capacidade de aglomeração a frio da mistura e, portanto, no desenvolvimento do processo de sinterização (Araújo *et al.*, 1986).

Distribuição Granulométrica

Inicialmente, quando ainda se trabalhava com um ou dois minérios de ferro 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 deva ser limitada pelas malhas de 6,35mm e 0,149mm, com aproximadamente 50% de material acima de 1,0mm. 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, conduziram à obtenção de uma nova faixa granulométrica tecnicamente aceitável para a mistura de minérios a sinterizar e, principalmente, compatível com a realidade da mineração (Honorato, 1993).

Assim, a distribuição granulométrica do *sinter feed* sugerida por *Astier* evoluiu para o conceito de distribuição granulométrica de mistura de minérios, representada na Figura 3.1 pela porção hachurada (Davila, 2012). Em suma, tem-se:

- 0% acima de 9,5mm;
- 5% máximo acima de 6,35mm;
- 45 a 60% entre 1,0mm e 6,35mm;
- 10 a 25% máximo abaixo de 0,149mm.

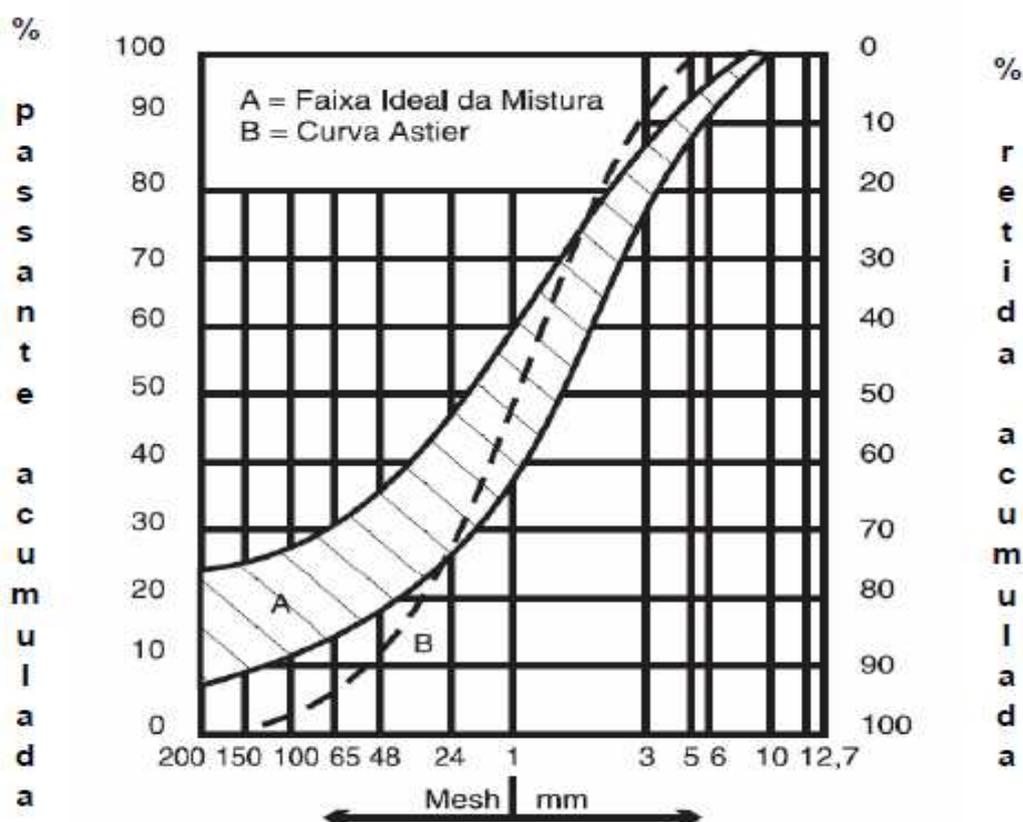


Figura 3.1 – Distribuição granulométrica ideal para a mistura de minérios (curva de Astier), segundo Carneiro *et al.*, citado por Honorato *et al.* (Davila, 2012).

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. Para minérios hidratados esta correlação não é válida, embora a permeabilidade a frio da mistura seja, em geral, mais elevada para a mesma granulometria (Goldring *et al.*, 1989):

Poder de Aglomeração a Frio dos Minérios de Ferro

Entende-se por poder de aglomeração a frio dos minérios a capacidade que eles têm

de formar micropelotas ou grânulos quando, providos de certa umidade, são submetidos a uma etapa de misturamento e micropelotização. Esta é uma característica bastante desejável nos minérios de ferro por várias razões, entre elas o aumento de produção e a melhor qualidade do produto (Azevedo *et al.*, 2013):

De acordo com estudos realizados sobre o tema, o fenômeno de micropelotização 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 micropelotas. A nucleação, deposição e coalescência são os que predominam no processo de micropelotização. A nucleação representa a formação inicial de micropelotas, resultantes da interação entre as partículas finas livres. Deposição, por outro lado, ocorre pela interação entre as partículas livres e as micropelotas já formadas. Finalmente, coalescência representa o mecanismo de crescimento que ocorre como resultado da interação entre as micropelotas (Roller, 1981).

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 micropelotas são as pontes líquidas e a força da capilaridade (Honorato *et al.*, 1993).

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 micropelotização pode ser encontrada em quatro estados do sistema água-partícula, dependendo do seu volume (Honorato *et al.*, 1993):

- 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 micropelotização. O teor de umidade ótimo é aquele no qual um menisco de água é formado em toda superfície dos poros existentes (Azevedo *et al.*, 2013).

Com relação ao poder de aglomeração a frio, o mesmo pode ser associado ao índice de granulação durante o misturamento e micropelotização, o qual varia de acordo com o tipo de material, que segundo Honorato *et al.* (1993) pode ser representado conforme Figura 3.2.

Observa-se pela Figura 3.2, 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 disso, ocorre uma piora com o tempo de misturamento. Acredita-se que as micropelotas formadas inicialmente se desintegram à medida que este tempo aumenta. O calcário e o coque possuem um poder de aglomeração a frio 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 3.3 mostra o comportamento final destas misturas (Honorato *et al.*, 1993).

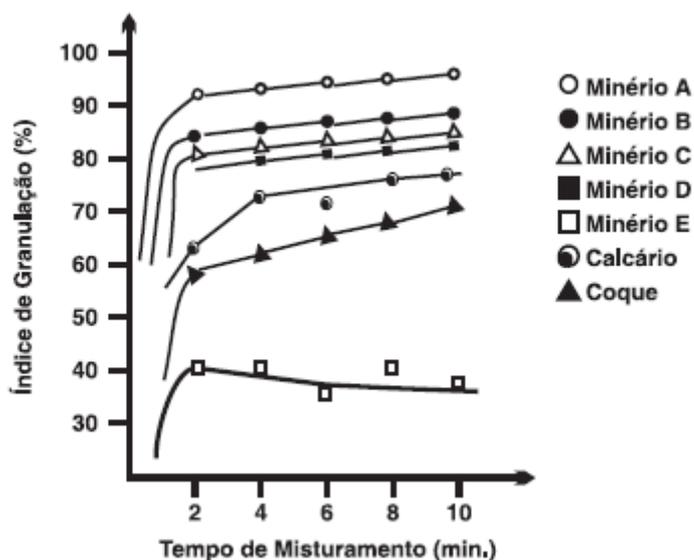


Figura 3.2 – Poder de aglomeração a frio de materiais diversos em função do tempo de misturamento, segundo Sugawara *et al.*, citado por Honorato *et al.*, 1993.

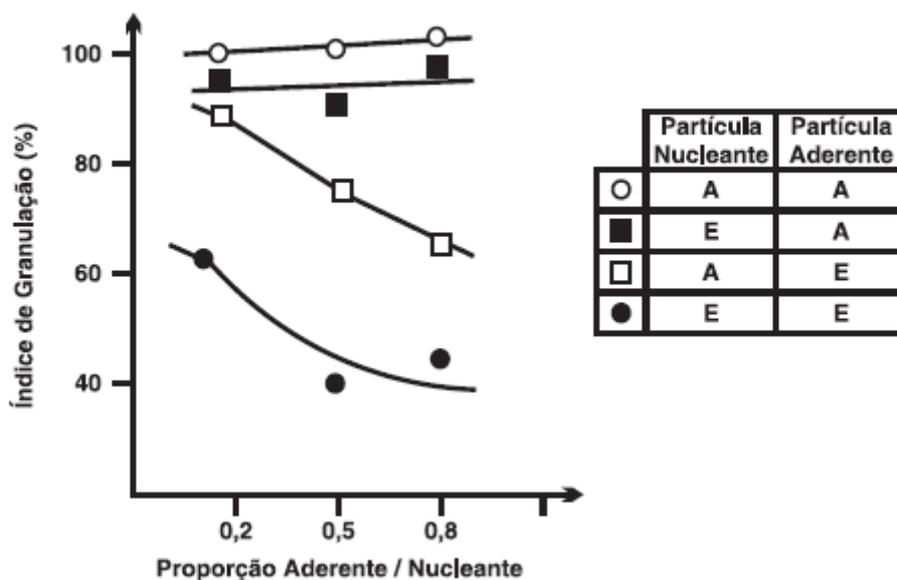


Figura 3.3 – Combinação de minérios diferentes em função da proporção aderente/nucleante, segundo Sugawara *et al.*, citado por Honorato *et al.*, 1993.

Analisando a Figura 3.3, 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 aglomera-se entre si, formando também micropelotas. 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 poder de aglomeração a frio 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, através da avaliação da capacidade de aglomeração a frio de minérios de ferro e misturas de sinterização.

De acordo com Ishikawa *et al.* (1982), a formação das micropelotas 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 (1981), o compromisso entre nucleantes e aderentes não é suficiente para que uma mistura apresente uma boa aglomeração a frio. Outros fatores, talvez mais importantes, devem ser considerados tais como: rugosidade, forma e porosidade das partículas e a natureza da ganga do minério de ferro.

Araújo *et al.* (1986), Nogueira (1987) e Caporali *et al.* (1998), aprofundam na classificação de Roller (1981) e Ishikawa *et al.* (1982) 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.

Os minérios de ferro brasileiros associam, em sua maioria, 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 *et al.*, 1998). Ademais, os minérios podem conter diferentes constituintes mineralógicos acessórios, tais como quartzo, caulinita, gibbsita, etc., contendo, ainda, diferentes valores de porosidade 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.

Na Tabela 3.1 Ishikawa *et al.* (1982); Araújo *et al.* (1986) descrevem os tipos e características intrínsecas das partículas do sinter feed dos minérios de ferro brasileiros a estrutura ideal do microaglomerado produzido na etapa de aglomeração a frio.

3.3. Fundentes para Sinterização

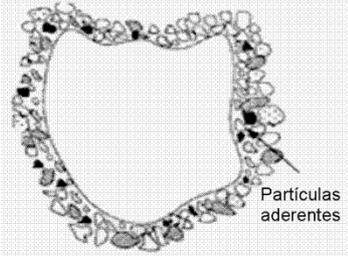
Os fundentes têm como função básica, escorificar as impurezas contidas na carga, pelos minérios e pelo combustível sólido, formando uma matriz de escória capaz de promover a coesão dos grãos dos minérios de ferro, de modo a proporcionar ao sinter uma resistência adequada à sua utilização no alto-forno.

Os fundentes são classificados em: básicos, portadores de CaO e/ou MgO e ácidos, portadores de SiO_2 e/ou Al_2O_3 .

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 sinter de basicidade binária (B_2) compatível com a marcha operacional do alto-forno. Os principais fundentes usados em sinterização são calcário, cal, serpentinito, dunito e dolomita.

É usual estabelecer uma diferenciação entre fundentes e adições. As adições, quando usadas, servem para corrigir alguma característica da mistura a sinterizar ou reaproveitar resíduos gerados na operação da usina. Exemplos de adições: carepa de laminação, resíduo industrial, pó de balão de alto-forno, escória de alto-forno, minério de manganês, etc. Uma vez que esses materiais, fundentes e adições, devem incorporar-se totalmente ao sinter, é imprescindível que apresentem características físicas e químicas que viabilizem sua utilização (Azevedo *et al.*, 2013).

Tabela 3.1 – 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 al.*, 1982; Araújo *et al.*, 1986).

↑	Partículas do <i>sinter feed</i>		Estrutura ideal do microaglomerado (a frio) 
	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.		
6,3mm	Nucleantes 2	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.	Tramas das Partículas Nucleantes Granoblásticas: Cristais xenomorfos de hematita. Complexamente intercrescidos (Ex. Minas de Mutuca, C. Feijão, Carajás, etc.) Lepidoblásticas: Cristais orientados de hematita ao longo do plano basal (Ex. Minas de Andrade, Cauê, Morro Aguso, 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)
3,0mm		Nucleantes 1 São os nucleantes ideais, pois são mais efetivos com relação à capacidade de deformar a camada aderente.	
1,0mm ou 0,7mm	Intermediárias Essas partículas não se comportam nem como nucleantes e nem como aderentes. Devem ser minimizadas na composição da mistura a sinterizar.		Tipologia das Partículas Aderentes e Nucleantes Especularisíticas (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.).
0,3mm ou 0,2mm	Aderentes 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.		
0,105mm	Superfinas São partículas de pellet feed. 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 (Índice de Degradação sob Redução) do sinter.		
↓			

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

dolomita, que é um carbonato de magnésio pouco reativo, e que demanda alta energia para a decomposição (Ishikawa *et al.*, 1982).

3.4. Combustíveis para Sinterização

Combustível é um material que 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, de 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 (finos de coque), coque de petróleo, antracito e carvão vegetal): parte integrante do leito de sinterização que tem por finalidade queimar em presença de ar, fornecendo energia necessária (calor) 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 semifusão, deixando poros à medida que se queima (Honorato *et al.*, 1993).

Os finos de coque são 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 uso nos altos-fornos. Nas usinas que operam com altos-fornos a carvão vegetal, os finos desse combustível, frequentemente, são usados nas sinterizações.

O antracito pode ser usado na sinterização com resultados bastante aceitáveis. Nas usinas brasileiras o uso do antracito também já está consolidado. Tal fato se deve ao seu bom desempenho quando usado no processo de sinterização e a busca constante das siderúrgicas em elevar o rendimento coque enornado/carvão, gerando *déficits* de coque fino, cada vez maiores, para as plantas de sinterização.

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 adequada. 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 a saúde do homem por serem corrosivos e tóxicos.

3.5. Processo de Sinterização

3.5.1 Definição e Conceitos

A sinterização é um processo de aglomeração de partículas de minério de ferro que ocorre através de uma fusão incipiente, causada pelo calor produzido na queima de um combustível sólido adicionado a mistura. Pode ser entendido, também, como um processo de aglomeração a quente de uma mistura de finos de minérios de ferro, coque, fundentes e adições, com dosagens e composições químicas definidas, cujo produto resultante, o sinter, apresenta características químicas, físicas e metalúrgicas compatíveis com as solicitações do alto-forno (Araújo *et al.*, 1986).

O processo de sinterização é apresentado de forma genérica conforme fluxograma esquemático mostrado na Figura 3.4.

O processo industrial de sinterização tem como objetivo aproveitar os finos de minérios de ferro gerados nas minas ou nas instalações de tratamento mecânico, também o aproveitamento dos coprodutos industriais (pós, resíduos sólidos finos, etc.) de maneira a transformá-los em material de granulometria tal que possam ser utilizados nos altos-fornos. O sinter produzido somente com minério de ferro e combustível era de baixa redutibilidade porque continha muita fayalita, oriunda da sílica da ganga dos minérios. Inicialmente, os fundentes visavam diminuir a formação da fayalita. No entanto, a partir da década de 50, o processo de sinterização evoluiu

no sentido de se produzir um sinter que já contivesse todos os fundentes necessários ao processo do alto-forno (Davila, 2012).

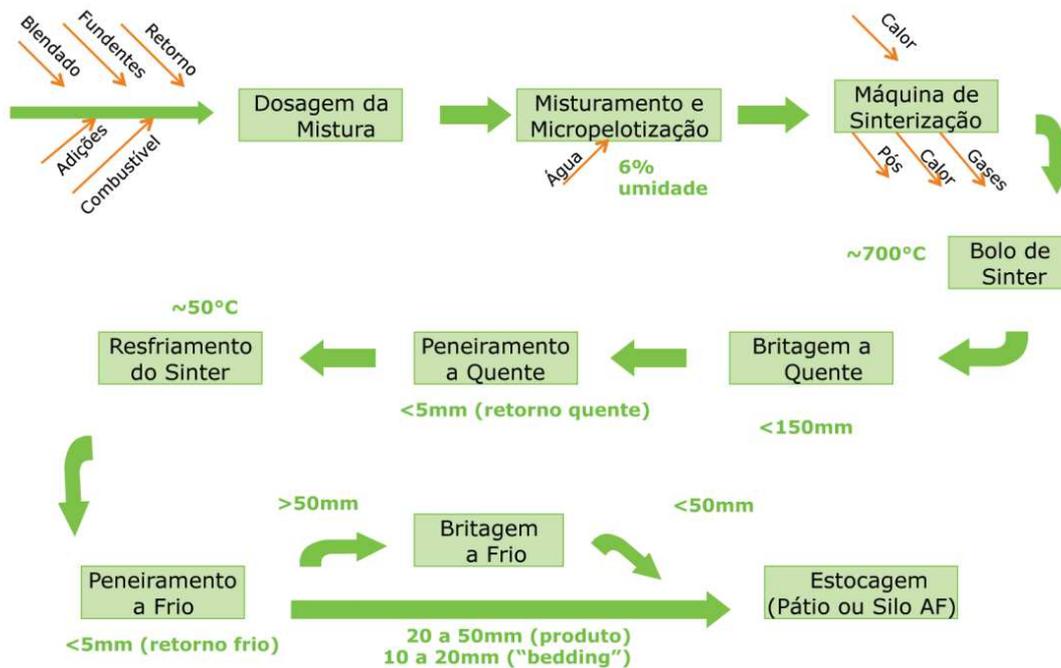


Figura 3.4: Fluxograma do processo de sinterização (Azevedo *et al.*, 2013).

A preocupação com a redução de energia também se estendeu à sinterização buscando-se, ao final da década de 70, a obtenção de teores mais baixos de FeO no sinter chamado "heterogêneo", diminuindo a parte fundida, mantendo o núcleo, e propiciando redução no consumo de energia e elevação da redutibilidade (Costa, 2013).

Basicamente, os minérios de ferro, fundentes, adições, sinter retorno e combustíveis sólidos (coque e/ou antracito) convenientemente dosados e devidamente umidificados são misturados em equipamentos adequados (misturadores) e carregados na "unidade de produção" (painéis ou esteira contínua). A umidade é importante para controlar a permeabilidade da camada e aumentar a resistência mecânica das micropelotas.

O início da queima da camada a sinterizar ocorre quando o combustível da superfície da camada é posto em combustão pelo calor gerado no forno de ignição e o ar é

succionado por um sistema de exaustão, passando a queimar o combustível disseminado na mistura a sinterizar.

A frente de combustão progride até o fundo do leito pela ação do fluxo de ar succionado. O calor gerado promove a vaporização da água, a decomposição dos carbonatos e hidratos (calcário, dolomita, Ca(OH)_2) e provoca fusão parcial das partículas que se aglomeram e permanecem ligadas por uma matriz de escória. A continuidade da sucção do ar permite o resfriamento da mistura sinterizada, obtendo-se assim, uma massa resistente e porosa denominada sínter.

Após o tratamento mecânico e classificação granulométrica, o sínter é considerado produto para uso no alto-forno, e será consumido como carga ferrífera (40% a 100%). Todos os processos comerciais operam segundo esse princípio, mas apenas um deles é contínuo e aplicável em maior escala, compatível com as capacidades dos modernos altos-fornos: processo contínuo de esteira rolante ou tipo *Dwight Lloyd* (Azevedo *et al.*, 2013).

Segundo Davila (2012), os processos intermitentes são: processo de panela de *Huntington-Heberlein* e processo de grelha fixa ou *Greenwalt*, ainda utilizados, porém, em raras aplicações.

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 e homogênea;
- Baixa porcentagem de finos;
- Baixa degradação sob redução;
- Alta redutibilidade;
- Baixo consumo de combustível.

Segundo Azevedo *et al.* (2013), os sínteres são definidos genericamente como:

- Não auto-fundente: quando é proveniente de minério de ferro hematítico ou magnetítico, com estéril de sílica e ao qual não se acrescenta nenhuma base (CaO ou MgO);
- Auto-fundente: onde são acrescentadas algumas bases para correção da composição química. Podem ser ácidos, quando a relação CaO/SiO_2 for inferior a 1, ou básicos, quando esta relação for superior a 1.

O processo de sinterização contínua surgiu em 1906, desenvolvido por *DWIGHT LLOYD* no México, para sinterizar minério de cobre (Honorato *et al.*, 1993), e a primeira planta comercial para minérios não ferrosos construída em 1908. O desenvolvimento da tecnologia apresentava como objetivo o aproveitamento de resíduos industriais e de minérios de ferro finos. As unidades de sinterização foram aumentadas, progressivamente, sendo que o tamanho das máquinas evoluiu de cerca de 30m^2 para 600m^2 , apresentando ainda índice de degradação sob redução (RDI) controlado e produção compatível com os grandes altos-fornos.

Aliado ao baixo teor de FeO do sínter, procurou-se diminuir o teor de SiO_2 e aumentar a redutibilidade pelo controle da parte não fundida. Partiu-se então para o aprimoramento no controle do processo, melhorias da qualidade do sínter e economia energética.

3.5.2 Micropelotização da Mistura a Sinterizar

3.5.2.1 Homogeneização e Umidificação da Mistura a Sinterizar

Atualmente, grande parte das sinterizações está trabalhando no tratamento da mistura. Consegue-se, através de uma adequação da mesma, aumentar a permeabilidade do leito de sinterização, reduzir o consumo de combustível, aumentar a produtividade e minimizar a dispersão química e física do sínter.

O equipamento responsável por realizar a homogeneização, microaglomeração da mistura e promover também a adição de água para controle da umidade da mistura é um tambor rotativo de dimensões variadas denominado misturador (Figura 3.5).

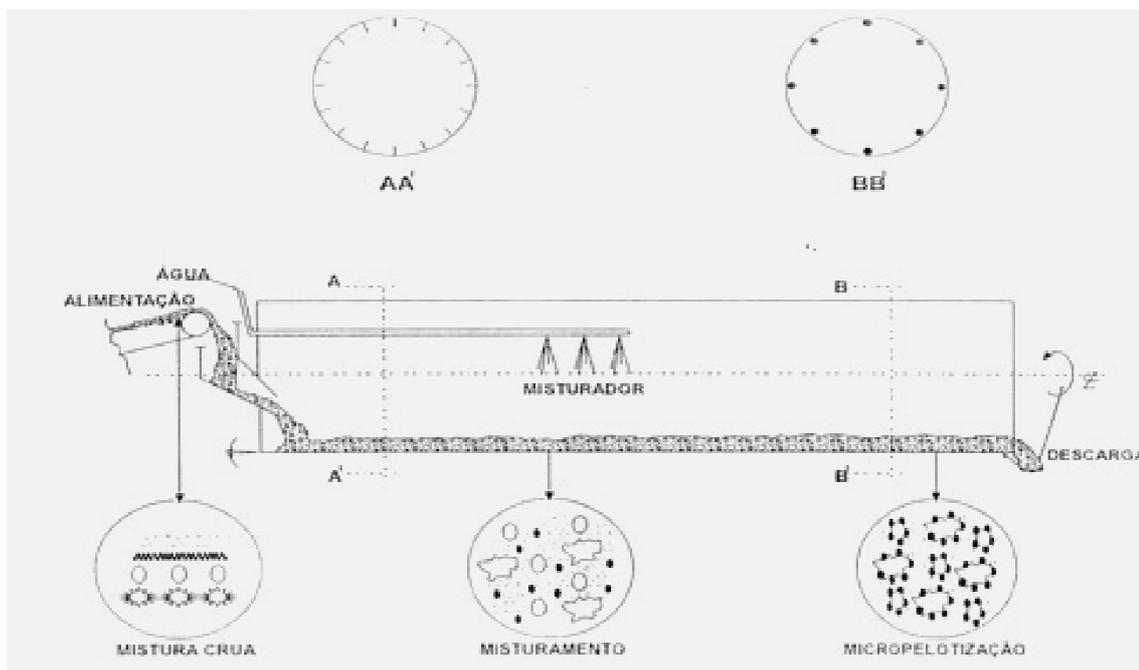


Figura 3.5 – Equipamento de homogeneização e micropelotização da planta de sinterização (Davila, 2012).

O tamanho médio da mistura após o misturador é maior que na entrada do mesmo, devido à diminuição da fração menor que 0,25mm pela formação das micropelotas.

A avaliação da eficiência da micropelotização pode ser traduzida com o auxílio do Índice de Granulação (IG), cuja fórmula matemática está descrita abaixo:

$$IG = \left(\frac{A+B}{A} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

A = massa das partículas primárias menores que 0,25mm

B = massa das partículas menores que 0,25mm após micropelotização

A distribuição granulométrica da mistura, antes e depois do misturador pode ser compreendida através da Figura 3.6.

A umidade pode afetar diretamente a permeabilidade da mistura à sinterizar, pois no processo de aglomeração a frio, o seu controle é de fundamental importância para o processo de formação da micropelota. Essa formação, quando realizada de forma efetiva, resulta em boa permeabilidade do leito de sinterização e consequente

elevação de produtividade da máquina de sínter. A dosagem de água é feita no misturador através do sistema que adiciona um teor de umidade padronizado de acordo com a massa da mistura introduzida no misturador (Roller, 1981).

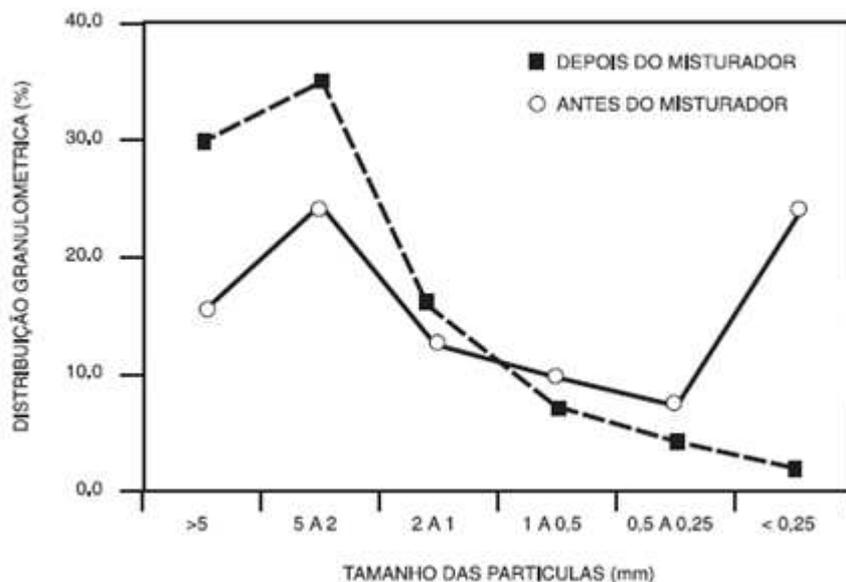


Figura 3.6 – Influência da micropelotização na distribuição granulométrica da mistura (Azevedo *et al.*, 2013).

Segundo Azevedo *et al.*(2013), os reflexos do controle de umidade nos rendimentos, na produção e na permeabilidade da mistura podem ser descritos através da equação mostrada a seguir e da Figura 3.7.

A determinação mais genérica da permeabilidade da mistura é:

$$P = \frac{Q}{A} \times \left(\frac{H}{S}\right)^n \quad (3.2)$$

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 (mmH₂O);

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

A elevação da umidade, além de certo nível, promove o encharcamento da matéria-prima com conseqüente destruição das micropelotas e alargamento da zona de condensação no processo de formação do sínter, refletindo negativamente na produtividade (Honorato *et al.*, 1993).

A umidade ideal necessária para se obter uma permeabilidade adequada da mistura a sinterizar depende da distribuição granulométrica da mistura, do poder de absorção das partículas e da umidade natural já presente nas mesmas (Honorato *et al.*, 1993). A Figura 3.7 mostra que a permeabilidade cresce com o aumento da umidade até certo valor, onde se estabiliza dentro de uma faixa razoável de variação, para depois cair drasticamente.

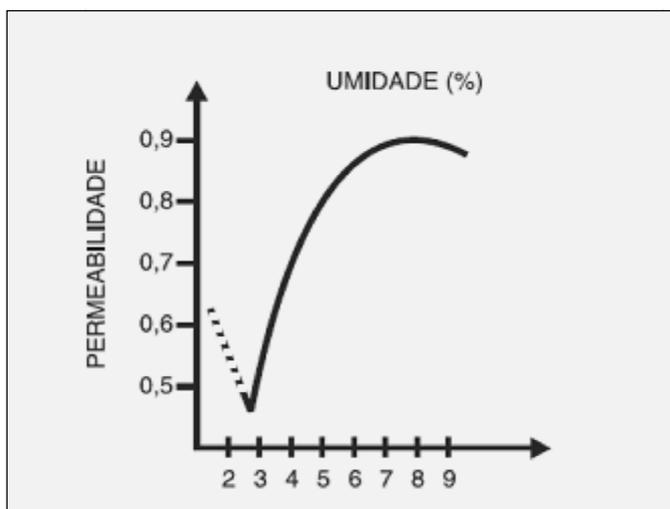


Figura 3.7 - Relação permeabilidade versus umidade da mistura a sinterizar, segundo Honorato *et al.* (1993).

3.5.2.2 A influência e o Controle do Misturamento na Formação das Micropelotas

No caso específico da micropelotização, esta pode ser traduzida pela união de partículas através de tensões superficiais, onde as partículas grossas (nucleantes) servem como base para aderência das partículas finas (aderentes) (Honorato *et al.*, 1993).

A formação das micropelotas depende do movimento das partículas dentro do misturador, o qual é regido pelas características do equipamento, assim como do fator de ocupação (volume de material no misturador/ volume do misturador) e do tempo de retenção do material no equipamento (Honorato *et al.*, 1993).

A Figura 3.8 mostra modelos de movimentos possíveis das partículas dentro do misturador em relação ao seu fator de ocupação (volume de mistura) e a sua rotação (Honorato *et al.*, 1993).

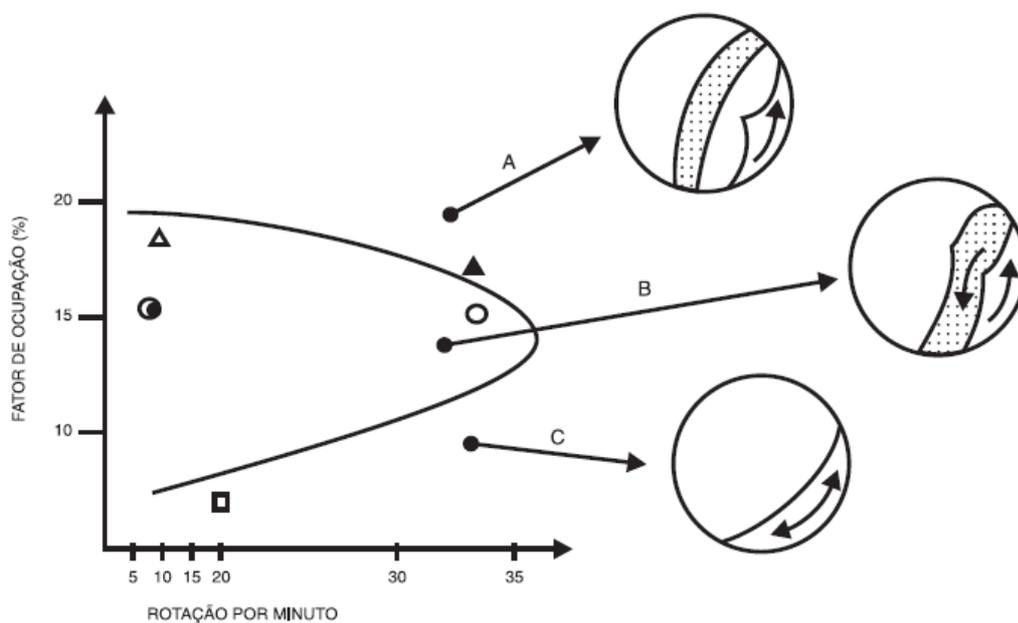


Figura 3.8 – Movimento das partículas no misturador, segundo *Nippon Steel Corporation*, citado por Honorato *et al.* (1993).

Em relação à Figura 3.8, o movimento A, chamado de catarata, tem a característica de formar as micropelotas 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 partículas aderentes e nucleantes, sendo, 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.

3.5.2.3 A influência de um Agente Aglomerante na Formação das Micropelotas

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 (Honorato *et al.*, 1993).

De todos os materiais que incrementam a micropelotização, o que melhor se comporta em termos de índice de granulação é a cal fina. A cal é o aglomerante mais comumente utilizado e apresenta efeito significativo no aumento de produtividade. Junto à umidade, é de fundamental importância para formação da micropelota, resultando na formação de partículas maiores e mais resistentes mecanicamente. A consequência desse resultado é uma maior produtividade (Honorato *et al.*, 1993).

O efeito da cal é, nesta etapa do processo, dar resistência a frio às micropelotas. A Figura 3.9 apresenta a influência da participação de cal na mistura em relação à produtividade e tempo de sinterização.

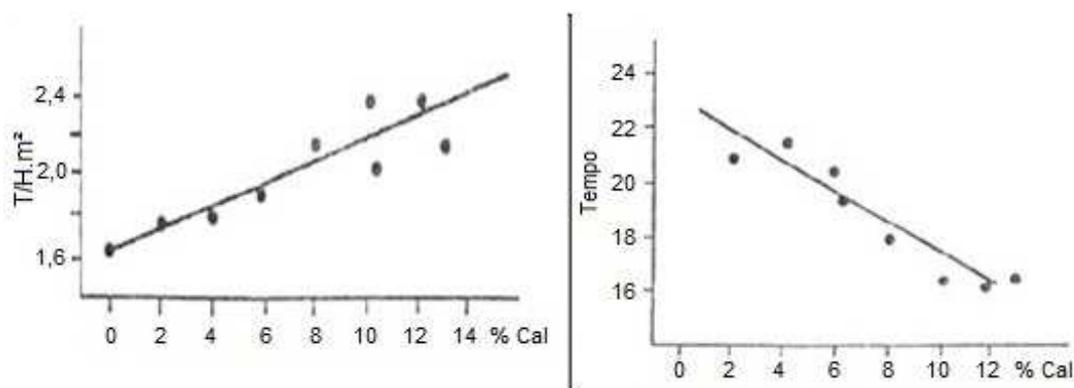


Figura 3.9 - Influência da participação de cal na mistura em relação à produtividade e tempo de sinterização (Azevedo *et al.*, 2013).

De acordo com a Figura 3.9, o aumento da porcentagem de cal fina adicionada à mistura indica o aumento de produtividade. Em termos de consumo específico de combustível, o uso de cal também é benéfico ao processo de sinterização, principalmente devido a: substituição de um carbonato (calcário) por um material

calcinado (cal fina) e a liberação de calor da cal devido à hidratação, aumentando a temperatura da mistura em menor escala (Azevedo *et al.*, 2013).

3.6. Mecanismos de Sinterização

O mecanismo de sinterização de minério de ferro é determinado pelo desenvolvimento de dois fenômenos distintos, segundo Azevedo *et al.* (2013):

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

O fenômeno de transferência de calor e o fenômeno químico de combustão do combustível, ocorrendo simultaneamente, definem as "zonas de sinterização" e assim todo o processo de aglomeração da mistura (Ishikawa *et al.*, 1982).

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

Além disso, a existência dos dois fenômenos, transferência de calor e reações químicas, resulta na formação de uma zona de reações termoquímicas no leito da mistura a sinterizar, gerando outras zonas com características diversas, cujos desenvolvimentos resultam na formação do mecanismo global de aglomeração a quente (Honorato *et al.*, 1993).

O esquema da Figura 3.10 mostra como ocorrem simultaneamente esses dois fenômenos (Honorato *et al.*, 1993).

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 1000°C, sendo que o gás e o material sólido trocam entre si as funções de receptor e fornecedor de calor, em curtas frações de segundo. 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 1200°C.

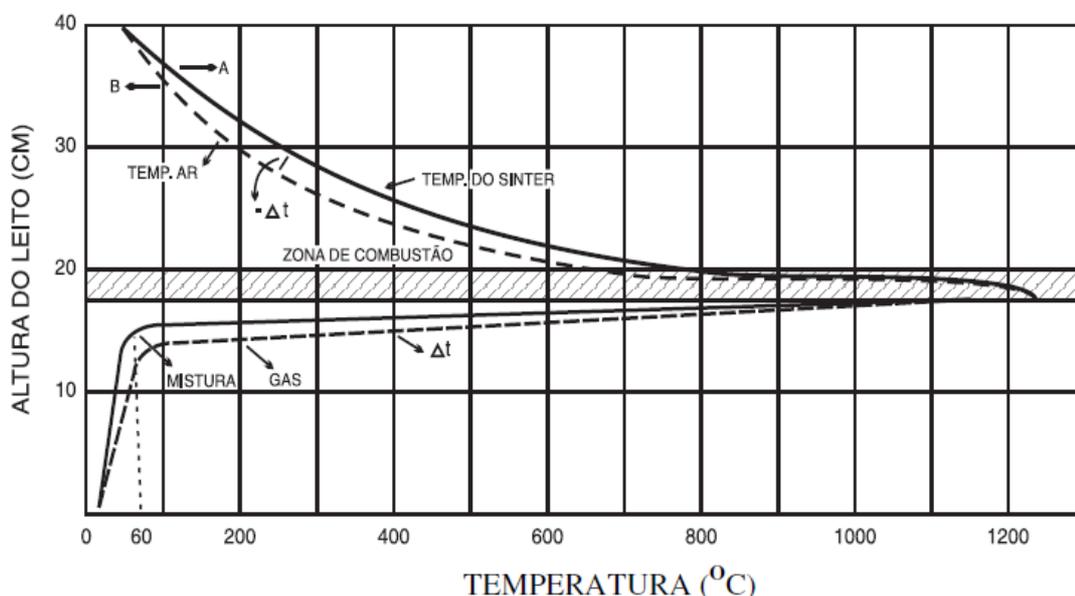


Figura 3.10 – Esquema de troca de calor no leito de sinterização, citado por Honorato *et al.*, 1993.

A curva "A" da Figura 3.10 mostra que a temperatura, acima de 60°C para 1200°C/1400°C, 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. As principais reações decorrentes do processo de sinterização são descritas a seguir:

- 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 atingir 60°C/70°C é novamente

condensado. A hidratação da cal é a única reação química que ocorre durante esta fase. Essa reação atinge intensidade máxima dentro do misturador quando é adicionado certo teor de umidade para controle do processo. Ao sair do misturador, a mistura, à qual se fez integrar os finos de retorno, está a uma temperatura de cerca de 60°C. Acima de 100°C inicia-se a zona de secagem.

- b) Entre 150°C e 200°C, mesmo no curto intervalo de tempo, toda umidade já foi vaporizada, iniciando-se a desidratação dos hidróxidos (150°C e 500°C), o que se faz consumindo calor do processo.
- c) Quando a mistura atinge a faixa de 500°C a 700°C, inicia-se a combustão do combustível sólido com desprendimento de calor, elevando o nível térmico do ambiente para 1200°C/1400°C.
- d) A decomposição dos carbonatos inicia-se em torno de 700°C, com consumo de calor. O carbonato mais usado na sinterização é o calcário, que inicia sua decomposição lentamente a partir de 600°C, absorvendo calor e baixando a temperatura dos gases. O CaO liberado na reação, em contato com os óxidos de ferro presentes, tende a formar 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, ocorrendo em alguns casos apenas na fase de resfriamento (até 800°C). Quando isso ocorre, o CaO formado não tem tempo e nem temperatura para reagir quimicamente, permanecendo, por isso, inalterado no bolo do sínter, sendo uma das causas da fragilização do mesmo.
- e) Na faixa de 900°C a 1400°C, onde ocorre a combustão de maneira expressiva, também chamada de zona de sinterização ou de escorificação, ocorrem as reações no estado sólido ou semilíquido, formando-se o “magma” do sínter, ou seja, o conjunto de silicatos, ferritos de cálcio, etc.,

que, após cristalização, juntamente com os óxidos de ferro, primários ou secundários, constituem o sinter.

- f) Atingida a temperatura máxima do processo, sob atmosfera ligeiramente redutora, inicia-se o resfriamento do sinter sob atmosfera fracamente oxidante, pois o único gás acima da zona de combustão é o ar. À temperatura ainda bastante elevada ocorre, então, uma reoxidação da magnetita. Em cerca de 900°C, o ciclo de reações químicas se completa, iniciando-se o resfriamento propriamente dito. O sinter da camada superficial, que normalmente para este tipo de equipamento, atinge uma espessura de 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 3.11 e 3.12 mostram, respectivamente, um corte longitudinal e transversal de um leito de sinterização com as zonas que ocorrem durante o processo (Honorato *et al.*, 1993).

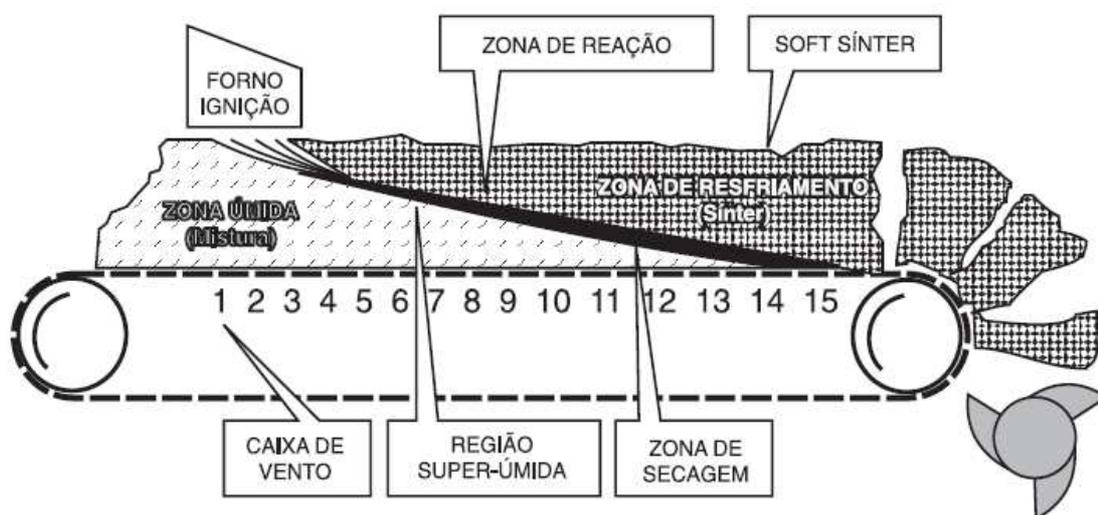


Figura 3.11 – Corte longitudinal de um leito de sinterização em um instante qualquer, segundo Honorato *et al.*, 1993).

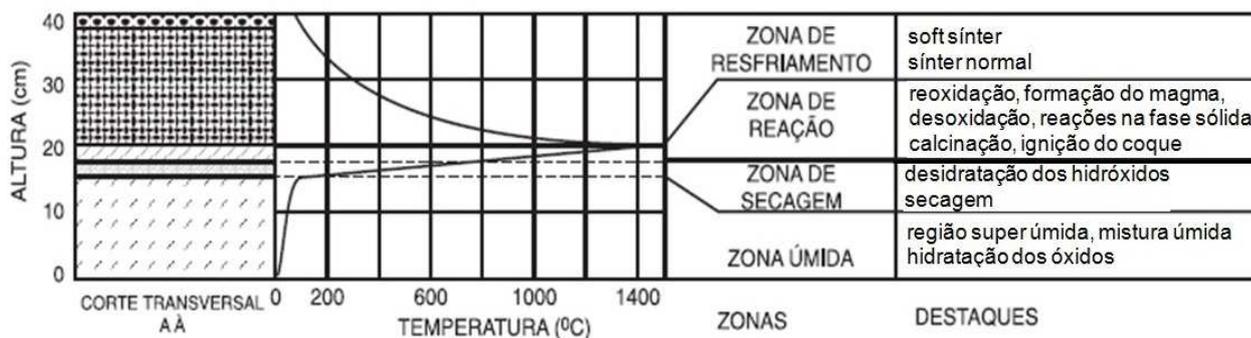


Figura 3.12 – Corte transversal e perfil térmico de um leito de sinterização em um instante qualquer, citado por Honorato *et al.*, 1993).

3.6.1. Tratamento Mecânico do Sínter

Após processamento na esteira, o sinter passa por um processo de adequação granulométrica, que consiste na britagem e peneiramento ajustando sua distribuição granulométrica às exigências para uso nos altos-fornos. Normalmente esta distribuição granulométrica situa-se na faixa de 5mm a 50mm de diâmetro de partículas do sinter, com um tamanho médio aproximado de 20mm. O fluxo operacional para isto e os equipamentos variam conforme as características e disponibilidade de *layout* das empresas.

Com relação à falsa grelha (sinter na fração de 10mm a 25mm), a mesma deve ter granulometria compatível com suas funções básicas de elemento de permeabilidade e inibidor de arraste de finos pelos gases de exaustão, além de sua condição de protetor térmico para as grelhas.

Em termos práticos, a essência do sistema de tratamento mecânico de sinter, reside no projeto e operacionalização do mesmo, de tal sorte a se atingir economicamente os limites de especificação granulométrica requerida pelo alto-forno, com o máximo de tamanho médio e a mínima recirculação de sinter retorno. O processo de peneiramento (classificação do sinter) passa a ser o ponto crucial do mesmo e, por isso, deve merecer atenção e acompanhamento especiais. Além disso, como as dimensões, inclinação e amplitude/tipo de vibração da peneira são características definidas pelo projeto, devem-se procurar alternativas de composição de telas ou malhas (área vazada/área total, tipo de fio/furo, dimensões de furos) e controle de vida útil para se tirar o melhor proveito em termos de atendimento às especificações de

qualidade e rendimentos. Isso é conseguido na prática com um minucioso programa de testes e controle de desempenho operacional.

3.7. Qualidade do Sínter Produto

Qualidade do sinter diz respeito aos resultados de análises e ensaios em laboratório do sinter produzido, com a finalidade de saber se o produto da sinterização está de acordo com as solicitações de qualidade para o bom desempenho do alto-forno.

A carga ferrífera dentro do alto-forno sofre alterações de temperatura, e grandes variações de pressão, queda e abrasão, daí o fato de ser necessário um sinter de boa resistência física e metalúrgica. Ademais, a qualidade química do ferro-gusa é, ao mesmo tempo, especificada pela aciaria e fortemente dependente da qualidade do sinter. Basta saber que o sinter, em geral, compõe mais de 70% da carga ferrífera do alto-forno. Para se conhecer o sinter produto dentro de uma siderúrgica são feitos ensaios rotineiros de qualidade química, granulométrica, física e metalúrgica.

Qualidade Química

É normalmente expressa pelos teores de:

- FeT: Ferro total;
- CaO: Óxido de cálcio;
- SiO₂: Óxido de silício ou sílica;
- Al₂O₃: Óxido de alumínio ou alumina;
- MgO: Óxido de magnésio;
- MnT: Manganês total;
- P: Fósforo;
- S: Enxofre;
- TiO₂: Óxido de titânio;
- FeO: Óxido de ferro ou *wustita*.

A partir de uma qualidade especificada para os teores destes compostos ou elementos, o resultado da qualidade fornecida pelo laboratório durante a produção do sinter serve para conhecer o produto e realizar ajustes da carga de modo a garantir a qualidade desejada. Além destes resultados, os resultados de basicidade binária (B₂)

do sinter também são de interesse para seu uso no alto-forno. Basicidade binária é a relação entre os teores de CaO e o de SiO₂, dentro de determinada faixa de controle. No geral, os sínteres são básicos ou hiperbásicos, ou seja, têm teor de CaO maior que o de SiO₂.

Física/Granulométrica

A resistência mecânica do sinter mede a modificação da granulometria do sinter às solicitações de pressão, queda, impacto ou abrasão. Usam-se os testes de queda (*SHATTER TEST*) e/ou de tambor (*TAMBLER TEST*) para mensurar tais propriedades.

Os ensaios de avaliação da qualidade física do sinter ou de outros constituintes da carga ferrífera do alto-forno são normatizados tanto pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, quanto por entidades internacionais (ISO, JIS, ASTM), por exemplo.

A análise granulométrica visa conhecer a distribuição de tamanho do sinter produzido, para conhecer o seu tamanho médio e para compor amostras que servirão para análises de qualidade química, física e metalúrgica. As amostras são compostas de acordo com a distribuição granulométrica, pois elas apresentam concentrações diferentes de elementos químicos e também são mais estáveis à degradação nas faixas granulométricas mais finas.

Qualidade Metalúrgica

A qualidade metalúrgica do sinter é representada pelas suas características de redutibilidade e de degradação sob as condições de redução no alto-forno. A tendência atual é de se produzir sinter com redutibilidade mais elevada sem comprometer a resistência mecânica a frio e a degradação sob redução (RDI). As características químicas das matérias-primas e do próprio sinter produzido têm influência marcante em suas propriedades metalúrgicas.

Índice de Degradação Sob Redução (RDI)

O ensaio tem como objetivo avaliar o comportamento do sinter quando, a 550°C no

alto-forno, for submetido a uma atmosfera redutora provocando a mudança de hematita (HC - hexagonal compacto) para magnetita (CFC - cúbico de face centrada). Avalia-se então a geração de finos de sínter nesta região do alto-forno (Azevedo *et al.*, 2013).

Como já foi mencionado, a degradação está associada à transformação hematita/magnetita, devido a alteração no reticulado cristalino e variação volumétrica. Alguns elementos presentes no sínter como Al_2O_3 e TiO_2 agravam este problema, pois incorporam-se na estrutura, tensionando a hematita secundária. O teor de FeO está relacionado ao nível térmico da camada, à temperatura máxima e às condições de redução. Existem ainda parâmetros como volume escória, teor de MgO, minérios hidratados e granulometria de fundentes que também afetam o RDI (Azevedo *et al.*, 2013). O ensaio de degradação sob redução estática (RDI) é realizado conforme a norma ISO4696-2.

Índice de Redutibilidade (IR)

A redutibilidade, que avalia a facilidade com a qual se reduz o óxido de ferro do sínter em atmosfera redutora, apresenta grande importância no sentido de avaliar a redução dos óxidos de ferro na região superior da cuba do alto-forno. Uma maior redutibilidade propicia um aumento no rendimento do gás ascendente com consequente economia de redutor (combustível), otimizando o processo e aumentando a produtividade (Ishikawa *et al.*, 1982).

A obtenção de um sínter com alta redutibilidade é fortemente dependente de sua estrutura mineral, sendo que os fatores determinantes para esta estrutura estão diretamente relacionados com o perfil térmico da camada e com o tipo e propriedades das matérias-primas. O Fe^0 (ferro metálico), a estrutura mineralógica do sínter, os aspectos físicos (porosidade e superfície específica), a granulometria e a composição química do sínter são importantes influências para obtenção da redutibilidade (Azevedo *et al.*, 2013). O ensaio de Redutibilidade (IR) é realizado conforme a norma ISO7215.

Quanto aos escorificáveis reativos das matérias-primas e o teor de FeO nos sínteres homogêneo e heterogêneo devem ser sempre estudados para controlar os valores de redutibilidade (IR) e degradação sob redução (RDI).

Diz-se que um escorificável (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e MgO) é reativo, quando tem a possibilidade de, durante a fusão, vir a participar da parte fundida do sinter. O escorificável será tanto mais reativo, quanto menor for o tamanho das partículas. Caso o tamanho da partícula seja grande, haverá simplesmente a dissolução do mesmo, não existindo tempo suficiente de vir a participar da parte fundida (Ishikawa *et al.*, 2013).

Como exemplo, para o caso particular de SiO_2 , se o mesmo composto for adicionado ao sinter em partículas menores que 1mm ao invés de menores que 5mm, ocorrerá uma diminuição do tempo de sinterização e por consequência aumento da produtividade. Nesse caso também haverá uma diminuição do RDI (índice de degradação sob redução) (Azevedo *et al.*, 2013).

A diferença entre sinter homogêneo e heterogêneo, é que no heterogêneo existe a semi-fusão das partículas aderentes às nucleantes, mantendo as características dessas não fundidas. Isto é, sem dúvida, decorrente da menor quantidade de combustível sólido disponível para promover a fusão.

A denominação de sinter homogêneo ou heterogêneo também está ligada ao grau de redutibilidade do sinter, que por sua vez está associado ao teor de FeO . Assim, sínteres com baixo teor de FeO (menor que 8%) são denominados heterogêneos e com alto teor de FeO (maior que 8,0%), são denominados homogêneos (Ishikawa *et al.*, 2013).

O processo de sinterização se desenvolveu a partir da fabricação de sinter com elevado teor de FeO , basicamente por essa prática deve-se conduzir à diminuição dos valores de RDI. Esse teor elevado de FeO era conseguido às custas de elevados consumos específicos de combustíveis na sinterização e no alto-forno. Com a necessidade de se reduzir os consumos específicos de combustível e com a introdução de novas técnicas operacionais e controles de matérias-primas, foi possível produzir sinter de baixo teor de FeO . Essa técnica permite a obtenção de sinter de elevada redutibilidade (maior que 65%), favorecendo o fluxo gasoso no interior do alto-forno e possibilitando, ao mesmo, trabalhar com altos valores de produtividade nos altos-fornos (maior que $2,0 \text{ t/m}^3\text{xdia}$) (Davila, 2012).

O comportamento do valor do índice de degradação sob redução (RDI) sofre influência do teor de FeO do sínter. À medida que cresce o teor de FeO, aumenta a proporção de magnetita no sínter, diminuindo a proporção total de hematita, principalmente núcleos de hematita primária. Nestas condições, forma-se, durante o processo de resfriamento do sínter, a hematita secundária, ocasionando valores de RDI mais elevados. Para sínter homogêneo, o valor do RDI decresce com o aumento do teor de FeO e para sínter heterogêneo, decresce com a diminuição do teor de FeO. Assim, os piores valores de RDI acontecem para o sínter com valores de FeO próximos de 8,0% (Azevedo *et al.*, 2013).

3.8. Estudos em Unidade Piloto de Sinterização

Os testes em unidade piloto de sinterização são de fundamental importância no apoio ao processo, tanto no levantamento dos dados necessários ao dimensionamento do equipamento a ser instalado quanto na definição dos parâmetros de garantia e desempenho operacional a serem utilizados. Os testes permitem a definição dos parâmetros de sinterização de misturas de diferentes minérios, ferrosos ou não ferrosos, tendo sido utilizados também apenas no conhecimento da qualidade de minérios de ferro ou em apoio a trabalho de marketing.

Os testes de sinterização em laboratório cresceram em importância juntamente com o aumento do tamanho das máquinas industriais de sinterização nas décadas de 1950/1960. Até essa época, devido à reduzida escala de produção, era comum a realização de testes diretamente em escala industrial. O aumento de tamanho das máquinas de sinterização que vieram a seguir inviabilizou totalmente este procedimento, devido ao risco de falta de produto para os processos subsequentes, no caso de ocorrência de problemas de produção ou qualidade. O uso da planta piloto de sinterização se tornou de fundamental importância na avaliação dos diferentes tipos de minério de ferro a serem utilizados em máquinas de sinterização (Duca, 2014).

A metodologia de simulação em escala piloto do processo de sinterização industrial (ensaio de sinterabilidade) é definida de modo a garantir, para uma mesma mistura, os seguintes aspectos, segundo Davila (2012):

- A produção de sinteres com características químicas e metalúrgicas semelhantes ao produzido industrialmente;
- A obtenção de índices de produtividade de mesma ordem de grandeza;
- A reprodução, em escala industrial, das tendências observadas nos testes em escala piloto.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Amostras de Minérios de Ferro

As amostras de *sinter feed* estudadas foram coletadas em áreas de mineração do Quadrilátero Ferrífero e foram identificadas como sendo do tipo: hematita friável (HeFr) e itabirito friável pobre (ItFr).

A amostra do minério de ferro hematita friável foi gerada utilizando a seguinte rota de processo: britagem em 8,0mm e 32,0mm, peneiramento a seco para a obtenção de um subproduto menor que 8,00mm. Em seguida, a fração menor que 8,00mm foi submetida ao peneiramento a úmido e deslamagem, obtendo produtos de 0,010 a 8,00mm, 1,00 a 8,00mm, 0,149 a 1,00mm e menor que 0,149mm. O fluxograma ilustrado pela Figura 4.1 apresenta as etapas de preparação da amostra.

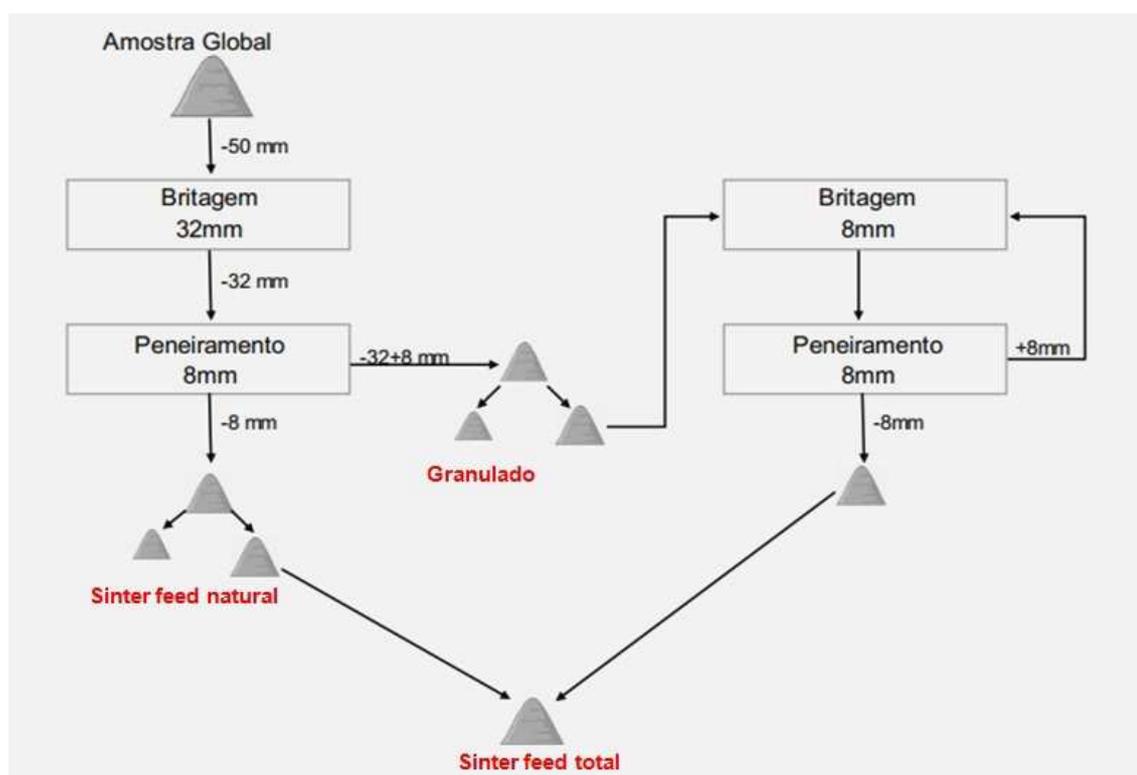


Figura 4.1 - Fluxograma das etapas de preparação da amostra do minério de ferro hematítico friável.

A amostra do minério de ferro itabirito friável pobre foi concentrado em planta de beneficiamento utilizando processos gravíticos e flotação, obtendo os seguintes

produtos: menor que 8,00mm, 1,00 a 8,00mm, 0,149 a 1,00mm e menor que 0,149mm. O fluxograma ilustrado pela Figura 4.2 apresenta as etapas de preparação da amostra.

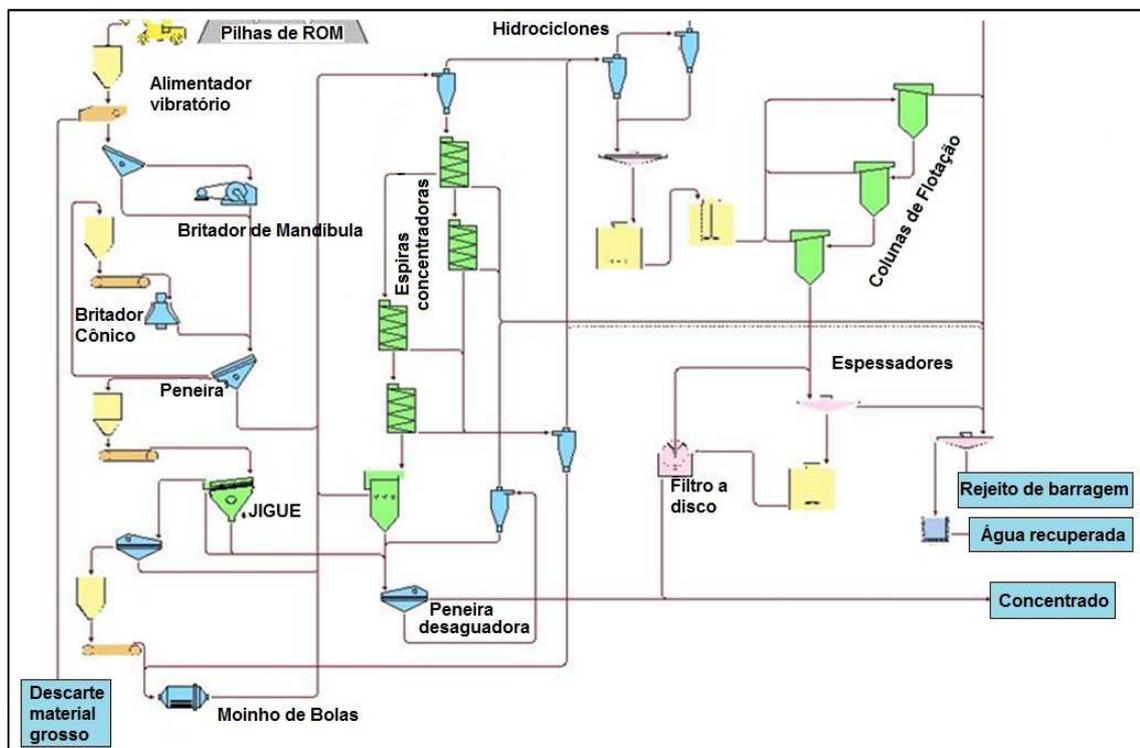


Figura 4.2 - Fluxograma das etapas de preparação da amostra do minério de ferro itabirítico friável.

4.2. Caracterização dos Minérios de Ferro

Os minérios de ferro foram caracterizados para relacionar com o comportamento dos mesmos nos processos de aglomeração a frio e sinterabilidade. Para a caracterização dos minérios de ferro foram realizadas análises químicas, granulométricas, mineralógicas e microestruturais, descritas a seguir:

Caracterização Química

Os minérios de ferro (*sinter feed*) gerados foram caracterizados através de análises químicas por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX). Os teores de FeO, importantes para se quantificar a magnetita e outros minerais portadores de Fe⁺² foram dosados por via úmida. A perda por calcinação (PPC) foi determinada por

gravimetria. Os teores dos seguintes compostos foram obtidos: FeT, FeO, SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, MnT, TiO₂, P e PPC.

Para a análise química são separados 10kg (de acordo com a ISO 3082), identificada e enviada ao laboratório. Para análise de determinação de umidade, foram separados cerca de 1,3kg do material.

Caracterização Física

Para identificação das características físicas dos minérios de ferro foram realizadas as seguintes análises: avaliação do poder de aglomeração a frio, capacidade de umidificação pelo efeito da pressão capilar dos minérios de ferro, porosidade por meio de picnômetro, determinação do ângulo de repouso dos minérios de ferro e análises granulométricas.

Foram realizados testes de aglomeração a frio dos minérios de ferro, determinando desta maneira o índice de granulação (IG) de cada minério de ferro, parâmetro fundamental para garantia de permeabilidade do leito de sinterização. Foram realizados ensaios de aglomeração a frio em betoneira e disco pelletizador, com objetivo de avaliar o desempenho das rotas de processo de aglomeração a frio das plantas de sinterização. Os testes de aglomeração a frio dos minérios seguiram as etapas descritas a seguir, que tem a etapa inicial de mistura, idêntica para os dois métodos de aglomeração testados.

- Toma-se 95kg do minério de ferro na base seca e 5kg de cal fina;
- Coloca-se os materiais na betoneira para misturamento a seco por 1 minuto;
- Adiciona-se água para ajustar a umidade desejada durante o tempo de mistura de quatro minutos, sendo esse tempo considerado misturamento a úmido;
- A mistura, assim homogeneizada, é empilhada em cone em piso liso e dela são compostas 10 subamostras com massa aproximada de 10kg cada.

O teste de misturamento e microaglomeração em betoneira consistiu das seguintes etapas:

- São quarteadas três subamostras de 1,25kg (amostra final);
- Teor de umidade de 6,30%;
- Tempo de misturamento: quatro minutos;
- Duas dessas amostras finais são separadas: uma delas é seca completamente em estufa com temperatura de $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e determina-se a granulometria a seco; a outra é seca até 2,5% de umidade em estufa com temperatura de $50^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$ e dela determina-se a granulometria da *quasi-partícula* para avaliação do resultado de microaglomeração. A distribuição granulométrica da mistura seca (granulometria a seco) foi determinada utilizando as malhas de 9,50, 8,00, 4,75, 2,83, 1,00, 0,500, 0,250, 0,149 e 0,125mm e a distribuição granulométrica da mistura úmida (granulometria da *quasi-partícula*) foi determinada utilizando as malhas de 9,50, 8,00, 4,75, 2,83, 1,00 e 0,500mm;
- Tanto para determinação da granulometria a seco como da *quasi-partícula* o teste é repetido três vezes e o resultado final é representativo da média aritmética dos três ensaios.

O teste de aglomeração a frio em disco pelletizador consistiu das seguintes etapas:

- Quarteamento de três subamostras de 10kg;
- Coloca-se uma subamostra no disco pelletizador para a micropelletização a seco por 30 segundos;
- Adiciona-se água para ajuste da umidade desejada (7,30%);
- Tempo de micropelletização (ou de aglomeração): 3min e 30s (tempo considerado como de misturamento a úmido);
- Separa-se duas amostras geradas no misturamento a úmido: uma delas é seca completamente em estufa com temperatura de $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e determina-se a granulometria a seco; a outra é seca até 2,5% de umidade em estufa com temperatura de $50^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$ e dela determina-se a granulometria da *quasi-partícula* para avaliação do resultado de aglomeração. A distribuição granulométrica da mistura seca será determinada utilizando as malhas de 9,50, 8,00, 4,75, 2,83, 1,00, 0,50, 0,250, 0,149 e 0,125mm e a distribuição granulométrica da mistura úmida será determinada utilizando as malhas de 9,50, 8,00, 4,75, 2,83, 1,00 e 0,50mm;

- Tanto para determinação da granulometria a seco como da *quasi-partícula* o teste é repetido três vezes e o resultado final é a média aritmética dos três ensaios.

O poder de aglomeração a frio foi avaliado a partir do Índice de Granulação (IG), cuja equação matemática está descrita abaixo:

$$IG = \left(\frac{A+B}{A} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

Onde:

A (partícula primária): percentual em massa da fração menor que 0,500mm antes da homogeneização da amostra;

B: percentual em massa da fração menor que 0,500mm após o peneiramento úmido da *quasi-partícula*.

A capacidade de umidificação foi definida como o teor máximo de água absorvida pela amostra de minério de ferro por unidade de massa. A amostra seca do minério de ferro na fração menor que 1,00mm é depositada no tubo de ensaio com a extremidade fechada por tela e filtro de papel para não haver saída de material. O tubo de ensaio com a extremidade em contato com a água está conectado em uma balança digital que mede a quantidade de água absorvida. A água em contato com a amostra de minério de ferro dentro da coluna é absorvida sob o efeito de pressão capilar. É feita a leitura da medição de absorção de água a cada 10s até que a amostra de minério de ferro sature em água. As medidas são feitas em triplicata e o resultado final é a média aritmética dos três valores obtidos. A equação utilizada para calcular a capacidade de umidificação (CU) está descrita abaixo:

$$CU = \frac{Ma}{Mm} \times 100 \quad (4.2)$$

Onde, Ma é a massa de água absorvida e Mm a massa de minério da amostra.

As amostras de minérios de ferro foram submetidas a testes de porosimetria, obtendo-se a densidade aparente conforme norma ISO 3852 e a densidade real por meio do

ensaio com picnômetro. De posse destes resultados, para cada tipologia de minério de ferro obteve-se: porosidade total, densidade aparente e densidade real.

Foi determinado o ângulo de repouso dos minérios de ferro com objetivo de avaliar a capacidade de escoamento, e principalmente, a influência no processo de aglomeração a frio. O ângulo de repouso do minério de ferro foi determinado usando uma estrutura metálica contendo um funil com capacidade de 2,8 litros, elevado a cerca de 30cm do piso. O material é colocado no funil até enchê-lo completamente e, então, abre-se uma pequena comporta e descarrega-o em superfície lisa, formando uma pequena pilha cônica. A altura e a base da pilha formada são medidas e calcula-se o ângulo de repouso do material pela equação da tangente (equação 4.3 mostrada a seguir). As medidas são feitas em triplicata e o resultado final é a média aritmética dos 3 valores obtidos. A Figura 4.3 apresenta o modelo de medida do ângulo de repouso.

$$\operatorname{tg} B = \frac{b}{d/2} \quad (4.3)$$

Onde, b é a medida da altura do cone e d o diâmetro da base do cone.

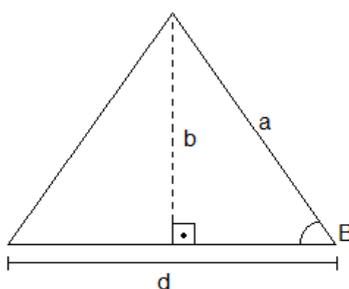


Figura 4.3 - Medida do ângulo de repouso dos minérios de ferro.

As análises granulométricas foram realizadas nas malhas de 8,00, 6,35, 2,83, 1,00, 0,500, 0,149, 0,105, 0,044 e menor 0,044mm, estes ensaios foram feitos em peneira vibratória. Para análises granulométricas foram separados cerca de 1,3kg do material.

Caracterização Mineralógica

O procedimento de microscopia é realizado com a utilização de um microscópio óptico,

apresentado na Figura 4.4, de luz transmitida e refletida polarizada, com sistema de captura de imagem, do fabricante Leica (modelo DMEP). Esse equipamento é tipicamente usado na caracterização de minérios de ferro e seus aglomerados (sínteres), pois as fases mais comumente presentes podem ser identificadas e discriminadas por meio de suas diferentes refletâncias para definir a forma das partículas primárias. A contagem modal e medição do tamanho das partículas primárias e cristais foram feitas nas imagens adquiridas, utilizando-se método tradicional manual.

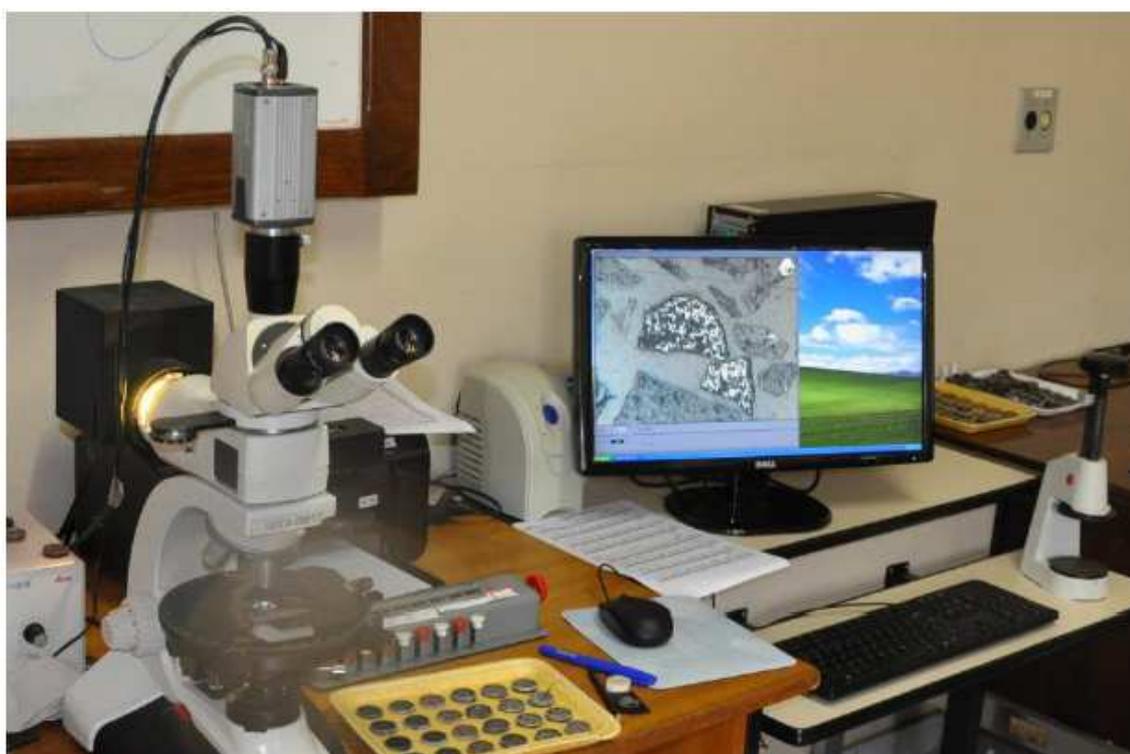


Figura 4.4 – Foto do equipamento microscópio óptico utilizado para realização das análises de microscopia.

As amostras foram embutidas, lixadas e polidas conforme padrão de preparação para análises microscópicas. As análises foram feitas através de varreduras em três seções polidas da amostra. As fotomicrografias foram tomadas em seções polidas de partículas da fração granulométrica compreendida entre 0,300mm e 0,149mm embutidas em resina. O comprimento do quadro das fotomicrografias é igual a 0,470mm e foram tomadas com o mesmo aumento. O foco do trabalho foi à análise de minerais opacos e o grau de liberação do quartzo em relação aos minerais de ferro. O estudo não contemplou minerais transparentes.

4.3. Testes em Sinterização Piloto

Todos os materiais que fazem parte das misturas de teste, tais como, os minérios de ferro, fundentes, combustíveis e adições, foram homogeneizados. Essa preparação é conduzida de acordo com a Norma ABNT – NBR 8956.

Os testes de sinterabilidade neste estudo têm como objetivo avaliar o desempenho de sinterabilidade dos minérios de ferro.

Foram realizados testes de sinterabilidade em planta piloto com minérios de ferro individuais e misturas.

Após os testes na sinterização piloto foram determinados os principais parâmetros de desempenho como: consumo de combustível, velocidade de sinterização e produtividade. Além da avaliação desses parâmetros, o sinter gerado também foi analisado, conforme está descrito no item 4.5.

Sete diferentes tipos de mistura foram elaboradas para os ensaios, os quais foram realizados em triplicata na sinterização piloto. Foram realizados testes com minérios de ferro individual e misturas com a hematita friável e itabirito concentrado friável em diferentes percentuais de participação, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Composição das misturas de minérios

Minérios	Mistura de minérios (%)						
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
HeFr	100	0	90	80	70	60	50
ItFr	0	100	10	20	30	40	50

Na Tabela 4.2, estão apresentadas as premissas de qualidade química objetivadas para o sinter produto e demais parâmetros do teste na sinterização piloto.

Para as misturas M1 e M2, o teor de SiO₂ do sinter objetivado foi diferente dos teores de SiO₂ das outras misturas. Essa diferença se fez necessária em função do teor de SiO₂ do minério de ferro itabirítico.

Tabela 4.2 - Características químicas objetivadas para o sínter e principais parâmetros de processo.

Parâmetro	Referência
Basicidade (CaO/SiO ₂) do sínter	1,75
Teor de MgO do sínter	1,50%
Teor de SiO ₂ do sínter (M1 e M2)	6,65%
Teor de SiO ₂ do sínter (M3,M4,M5,M6,M7)	5,50%
Teores de Al ₂ O ₃ , Mn e P	Residuais de cada mistura
Fonte de MgO	dolomita
Cal na mistura parcial	5,00%
Combustível sólido na mistura a sinterizar	Retorno balanceado
Umidade da mistura	7,30%
Altura da camada da máquina	500mm
Depressão de ignição	900mmH ₂ O
Depressão de queima	1.200mmH ₂ O
Depressão de resfriamento	700mmH ₂ O
Massa de falsa grelha	4,5kg
Tempo de ignição	1 minuto

A Tabela 4.3 apresenta o planejamento experimental das queimas com a porcentagem de cada matéria-prima que compõe cada uma das misturas preparadas (porcentagem na mistura total).

Como combustível, foram utilizados coque e antracito (55% de coque + 45% de antracito). A quantidade de combustível utilizada é a necessária para balancear os finos de retorno, ou seja, aquela que garante que a quantidade de “finos de retorno produzido” seja igual à quantidade de “finos de retorno introduzido” na mistura correspondente, com uma determinada tolerância (10% em relação à fração menor que 5,0mm). O percentual de sílica adicionada via quartzito nas misturas M1, M3, M4, M5, M6 e M7 foi definido de maneira a manter o mesmo patamar de SiO₂ no sínter produto. A fração maior que 1,00mm da mistura de minérios para mistura M1 foi de

34,60%, para M2 foi de 29,99% e para as demais M3, M4, M5, M6 e M7 foram mantidas em 39,00% \pm 1pp.

Tabela 4.3 - Porcentagem das matérias-primas que compõem cada uma das misturas (porcentagem na mistura total).

Mistura a Sinterizar	M1 (100)	M2 (100)	M3 (90/10)	M4 (80/20)	M5 (70/30)	M6 (60/40)	M7 (50/50)
MFHe (hematita)	47,12	-	44,73	39,81	34,95	30,05	25,08
MFlt (itabirito)	-	50,59	5,30	10,61	15,93	21,24	26,48
Calcário	4,97	4,90	1,56	1,58	1,54	1,55	1,75
Dolomita	4,49	4,13	5,18	5,16	5,14	5,11	5,08
Cal virgem	3,57	3,57	3,62	3,62	3,62	3,62	3,62
Coque/Antracito	3,60	3,60	3,64	3,60	3,60	3,60	3,60
Degradado	8,21	8,21	8,17	8,17	8,18	8,19	8,16
Quartzito	3,03	-	2,97	2,63	2,22	1,81	1,40
Retorno	25,00	25,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
Pó Coletor	-	-	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
Carepa	-	-	0,52	0,51	0,51	0,51	0,51

Para a validação dos testes em planta piloto, segue-se o padrão adotado que visa garantir a confiabilidade dos resultados e foram definidos como critérios:

- Teor de umidade das misturas com variação de \pm 0,2 pontos percentuais em relação ao valor visado;
- Massa de mistura seca carregada \leq 2% da massa entre as queimas;
- Tempo de sinterização \leq 7% entre queimas;
- Balanceamento de sínter retorno de 95% a 105% do sínter retorno carregado com variação de 5 pontos percentuais entre as queimas (massa do sínter retorno gerada deverá ficar no intervalo indicado em relação à massa do sínter retorno carregado).

Abaixo estão as principais características de operação da planta piloto de sinterização utilizada no presente estudo:

- Diâmetro médio da panela: 375mm;
- Altura da camada: 500mm (mistura + bedding), sendo bedding de 28mm;
- Pressão de sucção durante a queima de 1.200mmH₂O, durante a ignição de 900mmH₂O e durante o resfriamento de 700mmH₂O;
- Umidade visada nas misturas: umidade ótima previamente determinada;
- Relação ar/gás na ignição: 5/1;
- Combustível sólido: 55% de coque fino e 45% de antracito proveniente da Rússia;
- Utilização do nivelador de camada (segregador) piloto (simulador do sistema de carregamento industrial) no carregamento das misturas na panela.

A Figura 4.5 apresenta fotos dos principais equipamentos de uma planta de sinterização em escala piloto utilizados no presente estudo.



Figura 4.5 – Fotos dos equipamentos de uma planta de sinterização em escala piloto.

4.4. Testes de Avaliação da Qualidade do Sínter

Após a obtenção dos sínteres resultantes dos três ensaios, todo o material é homogeneizado, fazendo-se uma análise granulométrica e amostragem para análise química e para os testes físicos e físico-químicos.

Composição Química

Para avaliação química dos sinteres produtos foram realizadas análises em cada teste para a determinação dos teores dos seguintes compostos obtidos: FeT, FeO, SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, MnT, TiO₂, P e basicidade. As análises químicas foram realizadas por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX). Os teores de FeO foram dosados por via úmida.

Caracterização Mineralógica e Microestrutural do Sínter

A caracterização mineralógica do sínter consta da descrição das diferentes fases minerais presentes nos sinteres, bem como da sua distribuição nos mesmos.

Os sinteres obtidos foram submetidos a uma análise quantitativa das diferentes fases minerais presentes.

A estrutura do sínter é vista como o principal meio para explicar a natureza e a intensidade das variações experimentadas pelo sínter, cujas causas estão associadas ao tipo e quantidade de fases minerais presentes no aglomerado.

Caracterização Física do Sínter

A faixa granulométrica do sínter considerada ótima, para os altos-fornos, está entre 5mm e 50mm. Para atingir esta faixa, o sínter produzido na planta piloto é submetido a tratamento mecânico, com o peneiramento em série. Para análise granulométrica foram utilizadas as seguintes malhas: 50,0, 25,0, 10,0, 5,0 e menor que 5,0mm. O peneiramento foi feito em peneira vibratória.

Os sinteres gerados foram caracterizados quanto às resistências ao impacto e à abrasão, realizados no sentido de reproduzir as condições de manuseio do sínter até sua utilização nos altos-fornos.

O teste de queda é utilizado para qualificar a resistência do sínter em relação ao impacto. Os testes foram executados segundo a Norma JIS M8711.

O teste de tamboramento foi feito para testar a resistência à abrasão do sinter durante o manuseio. Os testes foram executados segundo a Norma ISO 3271.

Caracterização Metalúrgica do Sinter

Os ensaios de RDI (Índice de Degradação sob Redução) e redutibilidade são ensaios tradicionais, realizados nesta etapa do processo. Esses ensaios são de grande importância, pois indicam o comportamento da carga ferrífera na zona de preparação do alto-forno. O RDI indica a geração de finos durante a redução da carga e a redutibilidade indica a capacidade de ceder oxigênio para o gás redutor e está diretamente relacionada ao seu comportamento na zona coesiva, esta é a região do alto-forno onde os componentes da carga ferrífera e fundentes iniciam o amolecimento e se fundem.

Os testes de RDI são realizados de acordo com a Norma ISO 4696-2 e os testes de redutibilidade foram executados segundo a Norma ISO 7215. Esses ensaios foram realizados para avaliação dos sinteres produzidos a partir das misturas M1 e M2.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização dos Minérios de Ferro

Caracterização Química

Na Tabela 5.1 estão apresentados os resultados das análises químicas dos minérios de ferro avaliados.

O minério de ferro itabirítico, por sua vez, apresentou teores mais elevados de contaminantes, principalmente sílica, que foi de 6,41%, enquanto que o hematítico apresentou apenas 0,92%. O teor de ferro total difere entre os minérios de maneira expressiva. O minério de ferro itabirítico, por sua vez, apresentou menor teor de ferro total, que foi de 62,73%, enquanto que o hematítico apresentou 68,29%. O elevado teor de sílica e baixo teor de ferro total para o minério itabirítico é uma característica típica dos minérios itabiríticos.

Tabela 5.1 - Resultados de análises químicas dos minérios de ferro.

Análises Químicas (% em massa)										
Minério	FeT	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnT	P	FeO	TiO ₂	PPC
HeFr	68,29	0,001	0,92	0,57	0,07	0,22	0,017	1,57	0,047	0,29
ItFr	62,73	0,150	6,41	0,61	0,18	0,61	0,049	4,28	0,028	1,90

Caracterização Mineralógica dos Minérios de Ferro

A caracterização mineralógica do minério de ferro contribui para a compreensão dos fenômenos de aglomeração a frio, de sinterização, das propriedades do síter e o seu comportamento no processo de redução em altos-fornos.

A Tabela 5.2 apresenta a classificação mineralógica do minério de ferro itabirítico para diferentes granulometrias. Esse minério foi classificado como um minério magnetítico, hematítico, goethítico com presença de martitas.

Tabela 5.2 – Classificação mineralógica do minério de ferro itabirítico.

AMOSTRA - MINÉRIO DE FERRO FINO ITABIRITO FRIÁVEL		CLASSIFICAÇÃO MINERALÓGICA:								
		MAGNETÍTICO HEMATÍTICO								
		GOETHÍTICO COM MARTITA								
MINERAIS	Faixas granulométricas							% Total em volume	Peso específico	% Total em massa
	>1,0mm	>0,600 mm	>0,300 mm	>0,149 mm	>0,075 mm	>0,044 mm	<0,044 mm			
Hematita tabular monocristalina	0,00	0,36	1,74	8,23	14,35	16,21	8,22	6,99	5,20	8,35
Hematita granular monocristalina	0,00	1,27	1,93	2,80	8,12	16,38	16,56	5,90	5,20	7,05
Hematita tabular policristalina	4,82	2,89	2,32	1,93	0,78	0,00	0,00	2,26	4,42	2,29
Hematita granular policristalina	1,20	3,98	1,93	1,75	0,43	0,00	0,00	1,05	4,55	1,10
Hematita lobular	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,20	0,00
Martita	22,29	15,37	22,44	17,51	19,10	14,51	7,78	18,34	3,90	16,43
Magnetita	42,77	54,25	50,87	36,95	29,56	28,50	15,33	36,27	5,10	42,48
Goethita	22,29	15,73	13,93	18,91	21,26	20,82	48,78	22,81	3,50	18,33
Agregado	0,00	0,18	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	3,00	0,03
Quartzo	5,42	3,98	2,90	9,63	6,05	3,41	3,33	5,34	2,65	3,25
Outros	1,20	1,99	1,55	2,28	0,35	0,17	0,00	0,99	3,00	0,68
Distribuição % Fases	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		100,00
Volume em %	31,54	5,13	8,21	12,82	19,74	13,59	8,97	100,00		

A Tabela 5.2 apresenta as diferenças de classificação mineralógica nas diferentes granulometrias. O teor de magnetita se apresentou em maior percentual (acima de 36,95%) nas frações maiores que 0,149mm, no entanto representou 42,48% do total em massa e está presente em todas as faixas granulométricas. Já os minerais de hematita se apresentaram em maior percentual nas frações menores que 0,149mm, no entanto representaram 18,79% do total em massa, com pouco ou nenhuma participação nas frações maiores que 0,149mm. Os minerais goethita e martita se apresentaram em todas as frações granulométricas, sendo que para goethita a fração menor que 0,044mm foi a mais expressiva com participação de 48,78%, representando 18,33% do total em massa. Já para martita as frações maiores que 0,300mm foram as mais significativas, representando 16,43% do total em massa.

As micrografias mostradas na Figura 5.1 apresentaram partículas mistas de martita com magnetita (geralmente porosa), partículas de goethita (material amorfo com textura porosa) e também se vê a hematita tabular, o quartzo e fases de óxido de manganês. Normalmente a martita está presente em percentagem inferior. O principal

mineral contaminante é o quartzo. No minério de ferro itabirítico, foi verificada ainda a presença de minerais de manganês.

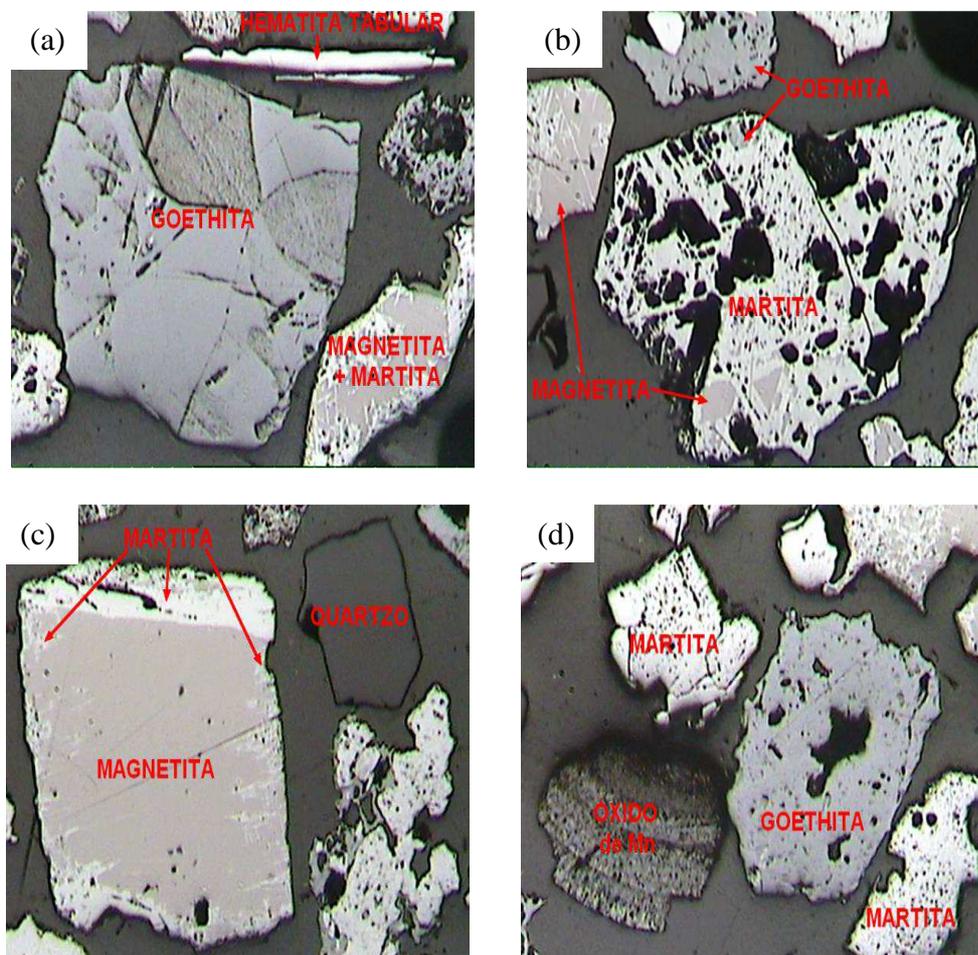


Figura 5.1 - Fotomicrografias do minério de ferro itabirítico (a, b, c e d).

A Tabela 5.3 apresenta a classificação mineralógica do minério de ferro hematítico caracterizado como um minério hematítico lobular, granular e tabular.

A Tabela 5.3 apresentou diferenças de classificação mineralógica nas diferentes granulometrias. O teor de hematita lobular se apresentou em maior percentual nas frações maiores que 0,149mm, no entanto representou 41,90% do total em massa e está presente em todas as faixas granulométricas. Já os minerais de hematita granular e tabular se apresentaram em maior percentual nas frações menores que 0,149mm, no entanto representaram 56,90% do total em massa, sendo a hematita granular com presença significativa na fração menor que 0,044mm.

Tabela 5.3 – Classificação mineralógica do minério de ferro hematítico.

AMOSTRA: MINÉRIO DE FERRO FINO HEMATITA FRIÁVEL		CLASSIFICAÇÃO MINERALÓGICA:								
		HEMATÍTICO LOBULAR, GRANULAR								
		E TABULAR								
MINERAIS	Faixas granulométricas							% Total em volume	Peso específico	% Total em massa
	>1,0mm	>0,600 mm	>0,300 mm	>0,149 mm	>0,075 mm	>0,044 mm	<0,044 mm			
Hematita tabular monocristalina	0,00	0,00	2,82	10,71	26,13	33,64	29,36	18,72	5,20	18,86
Hematita granular monocristalina	0,00	0,00	4,83	27,26	48,56	51,19	70,08	37,76	5,20	38,04
Hematita tabular policristalina	1,38	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,28	4,42	0,24
Hematita granular policristalina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,55	0,00
Hematita lobular	96,89	98,48	90,14	56,95	21,81	13,53	0,42	41,58	5,20	41,90
Martita	0,00	0,19	0,60	1,32	0,00	0,00	0,00	0,17	3,90	0,13
Magnetita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,10	0,00
Goethita	0,35	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	3,50	0,05
Agregado	1,04	0,38	1,01	0,38	0,00	0,00	0,00	0,33	3,00	0,19
Quartzo	0,35	0,57	0,60	2,44	1,23	0,73	0,14	0,64	2,65	0,33
Outros	0,00	0,19	0,00	0,19	2,26	0,91	0,00	0,45	3,00	0,26
Distribuição % Fases	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		100,00
Volume em %	16,60	7,17	10,57	6,79	11,32	18,11	29,43	100,00		

Os minerais goethita e martita tiveram participação pouco expressiva nas frações granulométricas analisadas, sendo que a goethita, está presente apenas nas frações maiores que 0,600mm. Não foi identificada a presença de magnetita nas frações granulométricas para a amostra analisada.

As micrografias mostradas na Figura 5.2 apresentam partículas de hematita lobular (forma regular e cristais compactos) e de goethita mista com hematita. Como principais constituintes, foi verificada também, a presença de gibbsita, quartzo e agregado terroso manganêsífero em menores proporções. Caracteriza-se pela presença de hematita lobular, granular e tabular, sendo a primeira mais abundante. Normalmente a hematita tabular está presente em percentagem inferior. No minério de ferro hematítico, foi verificada a presença de minerais de manganês.

Os resultados da caracterização mineralógica e microestrutural demonstram diferenças entre os minérios de ferro estudados nesse trabalho.

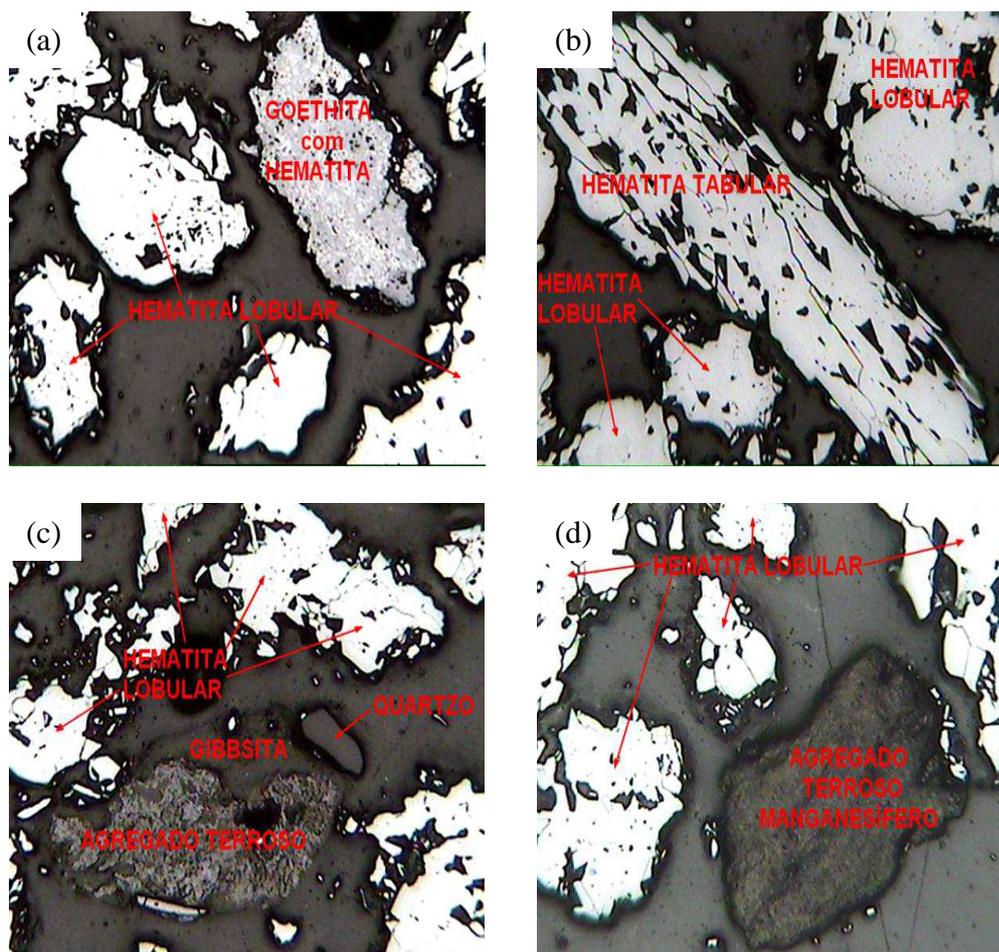


Figura 5.2 – Fotomicrografias do minério de ferro hematítico (a, b, c e d).

Caracterização Física dos Minérios de Ferro

Na Tabela 5.4 estão apresentadas as análises granulométricas dos minérios de ferro. O *sinter feed* do minério de ferro hematítico apresentou granulometria relativamente fina, desfavorável à permeabilidade do leito de sinterização, representado pela fração maior que 1,0mm em 34,60% e fração menor que 0,149mm em 39,41%. O *sinter feed* do minério de ferro itabirítico apresentou uma granulometria ainda menor que a do minério de ferro hematítico, representada pela fração maior que 1,0mm em 29,99% e menor que 0,149mm em 42,54%.

Tabela 5.4 - Resultados de análises granulométricas dos minérios de ferro.

Minério	Análises Granulométricas (mm - % em massa)									Tamanho Médio
	8,00	6,35	2,83	1,00	0,500	0,149	0,105	0,044	<0,044	
HeFr	4,24	2,05	14,50	13,81	10,67	15,32	1,51	18,06	19,84	1,57
ItFr	1,04	1,49	12,24	15,22	7,31	20,15	4,78	31,04	6,72	1,16

Na Figura 5.3 estão apresentados os resultados de capacidade de umidificação, porosidade, índice de granulação e ângulo de repouso. Tais resultados demonstraram diferenças significativas entre os minérios de ferro estudados.

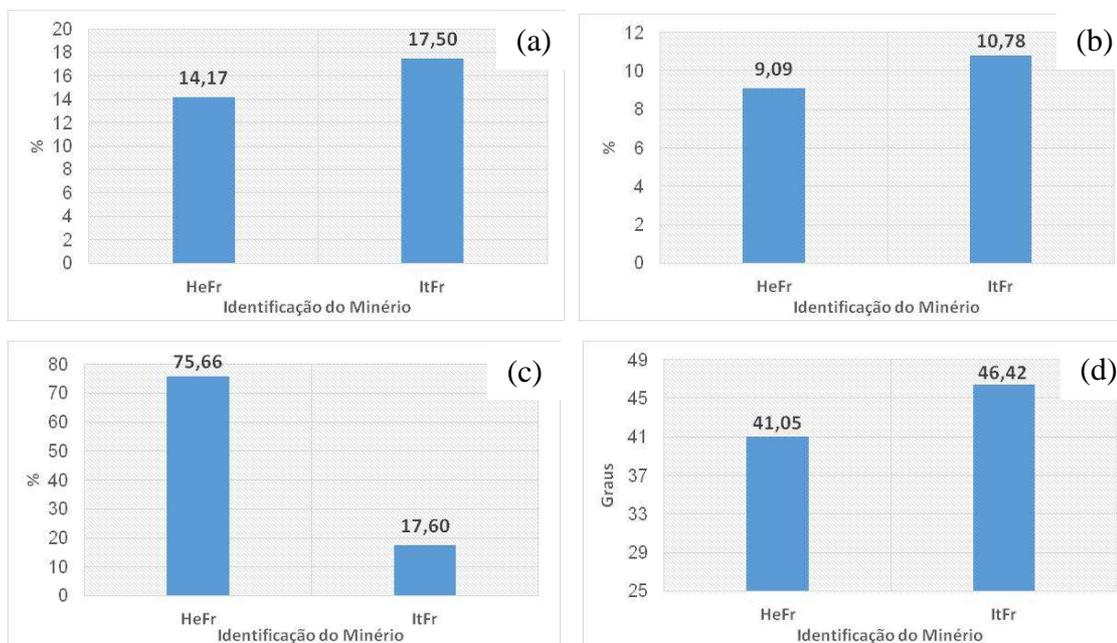


Figura 5.3 - Capacidade de umidificação (capilaridade) (a), porosidade (b), aglomeração a frio obtida através do índice de granulação (c) e medida do ângulo de repouso (d) para os minérios de ferro avaliados.

O minério de ferro itabirítico apresentou maior capacidade de absorção de água, representada pela capacidade de umidificação com índice de 17,50% em relação ao minério de ferro hematítico com índice de 14,17%. Com relação à avaliação da porosidade, o minério de ferro itabirítico obteve resultado superior, com valor de 10,78% em comparação ao minério de ferro hematítico de 9,09%.

Com relação ao índice de granulação, verificou-se uma diferença expressiva entre os minérios de ferro. Esse índice, para o minério de ferro hematítico foi de 75,66%, o qual é bastante superior, quando comparado ao minério de ferro itabirítico com índice de 17,60%. Esse melhor resultado de aglomeração propicia o crescimento no tamanho das micropelotas da mistura, o que tornará o leito de sinterização mais permeável, auxiliando o processo de sinterização, com benefícios em ganho de produtividade. Esse resultado, possivelmente se deu pela diferença na mineralogia dos minérios de ferro, sendo o hematítico menos poroso em função de sua constituição mineralógica.

Ainda quanto à aglomeração a frio (obtida através do índice de granulação), foi possível observar diferenças quanto à capacidade que eles têm de formar micropelotas quando providos de certa umidade e submetidos a uma etapa de misturamento e micropelotização. Essa propriedade também pode ser influenciada pela porosidade, que aumenta a absorção de água para a formação de um filme em torno da partícula, o que promove maior retenção de umidade.

Para o minério de ferro itabirítico, a umidade em que o teste de aglomeração a frio foi realizado (7,30%) pode ter influenciado o resultado, uma vez, que este minério de ferro provavelmente necessita de uma umidade maior para um melhor desempenho no processo de aglomeração a frio. Esse resultado provavelmente também sofreu influência quanto ao desempenho do minério de ferro relacionado à capacidade de umidificação, porosidade e presença de minerais porosos que necessitam maior quantidade de água para o processo de aglomeração a frio se comparado com o minério de ferro hematítico.

O ângulo de repouso a úmido varia significativamente com vários fatores. Partículas maiores, mais achatadas e mais angulosas permanecem estáveis em vertentes com declives mais acentuados. O ângulo de repouso está diretamente relacionado com a capacidade de escoamento do material. Esse parâmetro depende de particularidades do material como densidade, forma das partículas, granulometria e umidade. Materiais com ângulo de repouso menor que 40° apresentam boas características de escoamento, enquanto que maior que 50° um baixo índice de escoamento, o que dificulta seu uso nos processos de manuseio (Davila, 2012). O minério de ferro itabirítico ($46,42^\circ$) apresentou resultado semelhante ao hematítico ($41,05^\circ$) não havendo diferença significativa quanto a esse parâmetro, porém, para ambos, o resultado indica a importância do controle de umidade para o processo, uma vez que o descontrole deste parâmetro pode causar problemas significativos de manuseio.

5.2. Testes de Sinterização em Escala Piloto

Na Figura 5.4 estão apresentados os resultados dos principais parâmetros de desempenho obtidos nos ensaios em planta piloto de sinterização: consumo de combustível, velocidade de sinterização e produtividade em escala piloto.

Os resultados dos índices de desempenho em questão apontam para uma significativa influência das características dos minérios de ferro testados. De acordo com os resultados apresentados na Figura 5.4 (a), a produtividade foi inferior quando se utilizou 100% de minério de ferro itabirítico nos testes individuais. Nota-se que existe uma forte tendência de perda de produtividade quando se aumenta a participação do minério de ferro itabirítico concentrado na mistura a sinterizar, conforme Figura 5.5 (a). Entretanto, as misturas M3 e M4 apresentaram melhor desempenho quando comparado à mistura M1, com somente o minério de ferro hematítico. Quando se adicionou até 20% na mistura de minério itabirítico houve uma melhora significativa que pode ser explicada pelo aumento da basicidade obtida no síter (basicidade M1: 1,46, M3: 1,76 e M4: 1,80). Essa diferença significativa de basicidade influencia a variação do volume de escória do síter. O aumento da basicidade no síter leva a uma diminuição do percentual de hematita e o aumento do percentual de ferrito de cálcio acicular, em todas as formas. Este aumento tem interferência positiva e direta na redutibilidade e resistência mecânica do síter produzido, sendo mais favorável a produtividade e rendimento.

Em níveis altos de magnetita concentrada, os grânulos da mistura são mais deformáveis e a camada formada com estes grânulos é mais compressiva. Assim, camadas de sinterização contendo níveis altos de magnetita concentrada geralmente apresentam grande contração quando a sucção é aplicada resultando em perda de permeabilidade na zona úmida (Azevedo *et al.*, 2013). Esse fato e o baixo desempenho do minério de ferro itabirítico no processo de aglomeração a frio podem explicar a perda de permeabilidade do leito com reflexo no aumento do tempo de sinterização, exemplificado nas Figuras 5.4 (c) e 5.5 (c).

Quanto aos resultados do consumo de combustível não foram observadas variações significativas. Verificou-se que quando se utilizou os minérios hematítico e itabirítico individualmente, foram obtidos consumos superiores em relação às misturas avaliadas. Esses resultados podem ser explicados pela diferença entre os teores de perda ao fogo dos minérios de ferro (PPC hematítico: 0,29% e PPC itabirítico: 1,90%) que, neste caso, para o minério itabirítico é necessário maior energia disponível para o processo de sinterização.

Quanto às características físicas dos minérios de ferro avaliados, o minério hematítico obteve melhores desempenhos quanto à aglomeração a frio, menor porosidade e menor capacidade de umidificação que o minério itabirítico. Essas características influenciaram positivamente os resultados dos parâmetros de sinterabilidade, uma vez que permitiram a melhora da permeabilidade do leito de sinterização com consequente aumento da velocidade de sinterização.

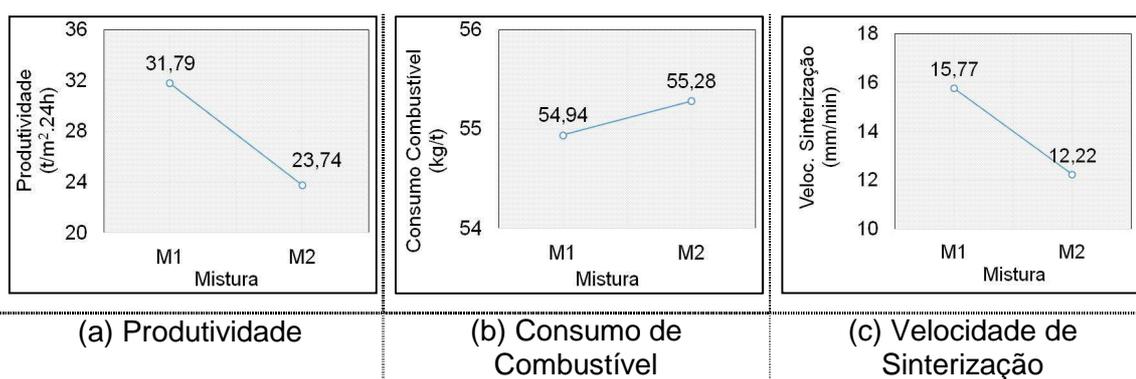


Figura 5.4 - Principais parâmetros de desempenho obtidos nos ensaios com misturas utilizando os minérios individualmente.

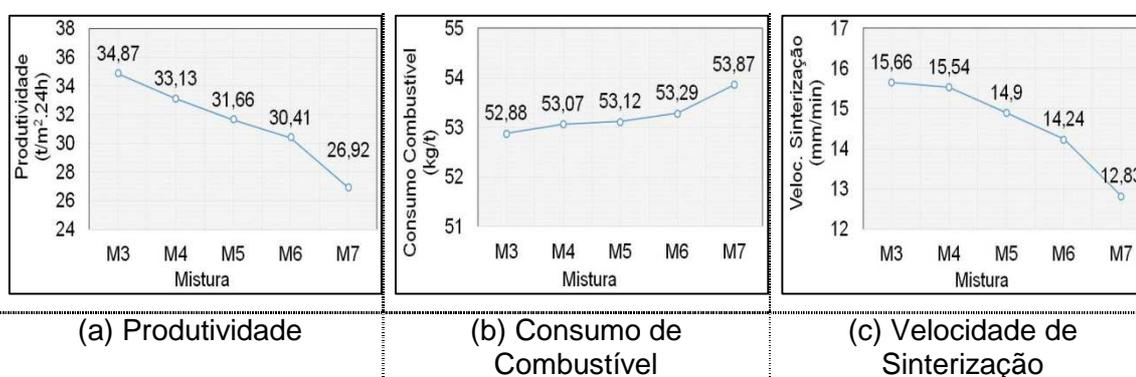


Figura 5.5 - Principais parâmetros de desempenho obtidos nos ensaios com misturas com variações na proporção do minério de ferro itabirítico.

5.3. Qualidade do Sínter Produzido em Escala Piloto

Abaixo são apresentados os resultados de qualidade do sínter obtido a partir dos minérios individuais e das diferentes misturas.

Qualidade Química dos Sínteres

Na Tabela 5.5 estão apresentados os resultados das análises químicas de cada sínter gerado em cada um dos testes realizados na sinterização piloto.

O sínter produzido apresentou uma variação no teor de SiO_2 das misturas M1 e M2 de 7,18% e 6,95%, respectivamente. Para as demais misturas houve uma variação de 5,08% a 5,91%. Para as misturas M1 e M2, o teor de sílica do sínter (6,65%) objetivado foi diferente dos teores de sílica das outras misturas (5,50%). Essa diferença se fez necessária em função do teor de SiO_2 do minério de ferro itabirítico.

O teor de ferro total dos sínteres produzidos apresentaram resultados coerentes com as misturas elaboradas.

Essas variações não foram significativas para as análises desse trabalho.

Tabela 5.5 - Qualidade química de cada sínter produto.

Análise Química (%)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Fe Total	56,25	55,42	58,44	58,30	58,48	57,95	57,18
FeO	6,03	6,05	7,15	6,68	7,26	6,87	6,84
SiO₂	7,18	6,95	5,08	5,21	5,52	5,90	5,91
Al₂O₃	0,91	0,90	0,90	1,00	1,00	1,03	1,23
CaO	10,46	11,28	9,13	9,16	9,16	9,04	9,56
MgO	1,39	1,42	1,54	1,38	1,41	1,33	1,43
MnT	0,26	0,65	0,36	0,44	0,45	0,48	0,58
P	0,036	0,053	0,024	0,034	0,035	0,039	0,043
Basicidade	1,46	1,62	1,80	1,76	1,66	1,53	1,62

Qualidade Física dos Sínteres

A Tabela 5.6 e a Figura 5.6 apresentam os resultados das análises granulométricas de cada sínter gerado em cada um dos testes realizados na sinterização piloto.

Os resultados de granulometria apresentados mostraram um tamanho médio dos sínteres, produzidos a partir das misturas M1 e M2, de 25,15mm e 25,79mm, respectivamente. Para as demais misturas houve uma variação de 26,71mm a 27,48mm. Essas variações não foram significativas para as análises desse trabalho.

Tabela 5.6 - Qualidade granulométrica de cada sinter produto.

Granulometria	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
50,0mm	6,32	9,79	9,07	9,82	9,34	10,35	9,69
25,0mm	36,14	31,17	40,87	37,27	38,39	39,29	38,68
10,0mm	33,91	36,09	26,43	26,86	26,88	25,61	27,36
5,0mm	22,49	21,94	22,72	24,97	24,32	23,68	23,12
Menor que 5,0mm	1,14	1,01	0,92	1,08	1,08	1,08	1,14
Tamanho Médio (mm)	25,15	25,79	27,34	26,71	26,78	27,48	27,11

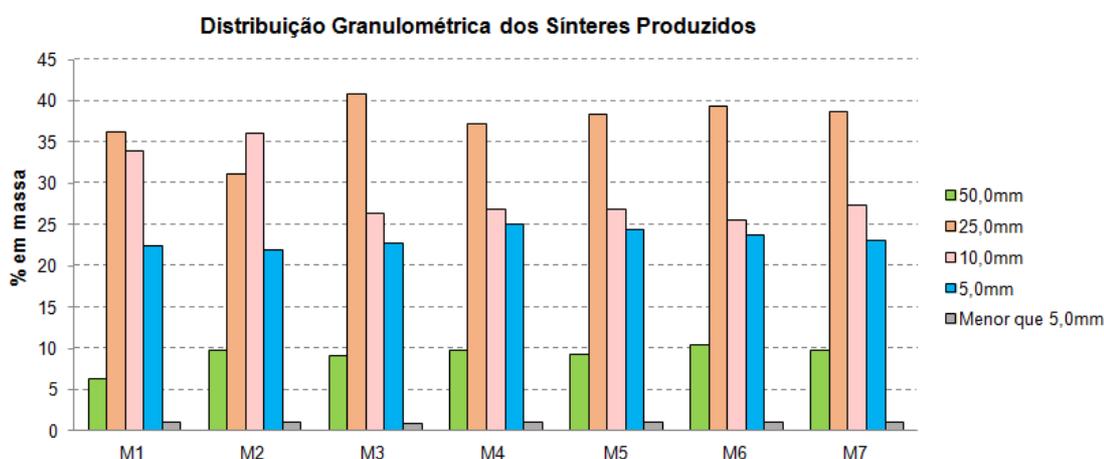


Figura 5.6 – Distribuição granulométrica dos sínteres produzidos em unidade piloto de sinterização.

Os sínteres produzidos apresentaram distribuição granulométrica semelhante e os resultados mantiveram as características de qualidade granulométrica mesmo com o aumento da participação do minério de ferro itabirítico na mistura.

A Figura 5.7 mostra os resultados do ensaio de tamboramento e teste de queda realizado para os sínteres produzidos a partir dos minérios individuais e misturas. Observa-se que, para o teste de tambor, quando se utilizou os minérios individualmente, este índice ficou acima de 80%, sendo estes superiores quando comparados às misturas avaliadas. Esta diferença positiva pode estar relacionada ao maior volume de escória ($\text{SiO}_2 + \text{CaO}$) do sinter individual em relação as misturas. O aumento do volume de escória favorece a resistência mecânica do sinter, pois leva a uma diminuição do percentual de hematita e o aumento do percentual de ferrito de cálcio acicular, em todas as formas.

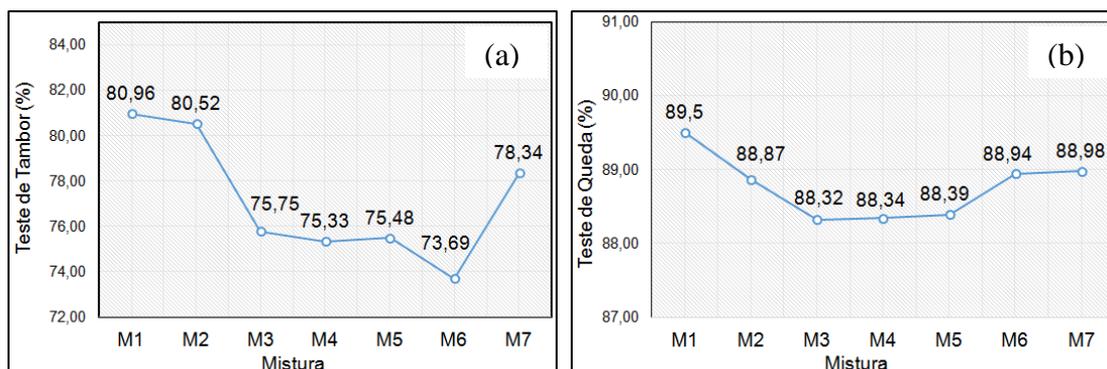


Figura 5.7 – Teste de tambor (fração maior que 6,35mm) (a) e teste de queda (fração maior que 10,0mm) (b) para os sinteres de minérios de ferro avaliados.

Qualidade Metalúrgica dos Sinteres (IR e RDI)

A Figura 5.8 apresenta os resultados obtidos dos ensaios de redutibilidade (IR) e do índice de degradação sob redução (RDI) dos sinteres produzidos a partir dos minérios de ferro individuais.

O índice de redutibilidade (IR) do sínter do minério de ferro hematítico apresentou um valor de 2,56 pontos percentuais superior ao minério de ferro itabirítico, conforme Figura 5.8a. Tal condição, possivelmente, está relacionada à elevação da porosidade do sínter, que aumenta a superfície de contato entre o gás redutor e os óxidos de ferro, favorecendo a etapa de redução. Outro aspecto deve-se à presença de magnetita no minério itabirítico, que favorece a formação de fase líquida durante o processo de sinterização, diminuindo a permeabilidade do leito e a porosidade do sínter.

Embora os resultados de redutibilidade dos sinteres produzidos a partir dos minérios de ferro avaliados se diferem em 2,56 pontos percentuais, esta diferença não é significativa perante o desvio aceitável considerando a norma utilizada no ensaio (5% absoluto). Assim, não podemos afirmar que o sínter do minério de ferro hematítico tem melhor redutibilidade quando comparado ao sínter de minério de ferro itabirítico.

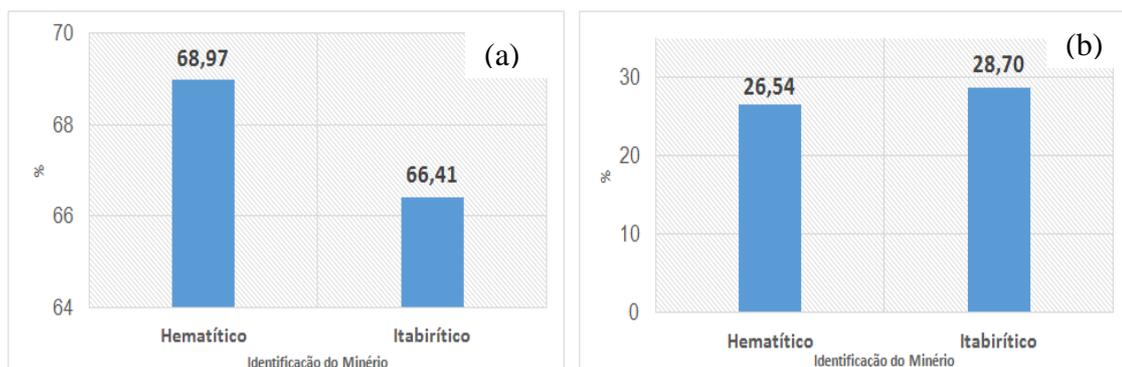


Figura 5.8 – Ensaio de redutibilidade (IR) - Norma ISO 7215 para os minérios de ferro avaliados (a) e ensaios RDI – Norma ISO 4696-2 para os minérios de ferro avaliados (b).

O índice de degradação sob redução (RDI) do minério de ferro itabirítico piorou em 2,16 pontos, se comparado com o resultado do minério de ferro hematítico. Um fator relevante é que a intensidade de degradação granulométrica dos sinteres, durante redução em baixas temperaturas, é fortemente influenciada pelos seus tipos de constituintes microestruturais e pela presença de Al_2O_3 e TiO_2 na rede cristalina das hematitas secundárias.

O resultado do índice de degradação sob redução 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 dos ferritos de cálcio; (ii) a maior quantidade de hematita dos sinteres da base.

Outra possibilidade para um melhor valor de RDI do sinter gerado a partir do minério de ferro hematítico é a sua melhor resistência mecânica que influencia positivamente o resultado de RDI.

Caracterização Mineralógica dos Sinteres

A análise mineralógica do sinter foi realizada nas frações entre 4,75mm e 10mm, entre 10mm e 19mm e entre 25mm e 50mm. A descrição mineralógica apresentam os diferentes minerais presentes nos sinteres, hematita, magnetita, ferritos de cálcio, silicatos e outros.

A Figura 5.9 apresenta a análise mineralógica quantitativa dos sinteres produzidos a partir dos minérios de ferro hematítico e itabirítico friável.

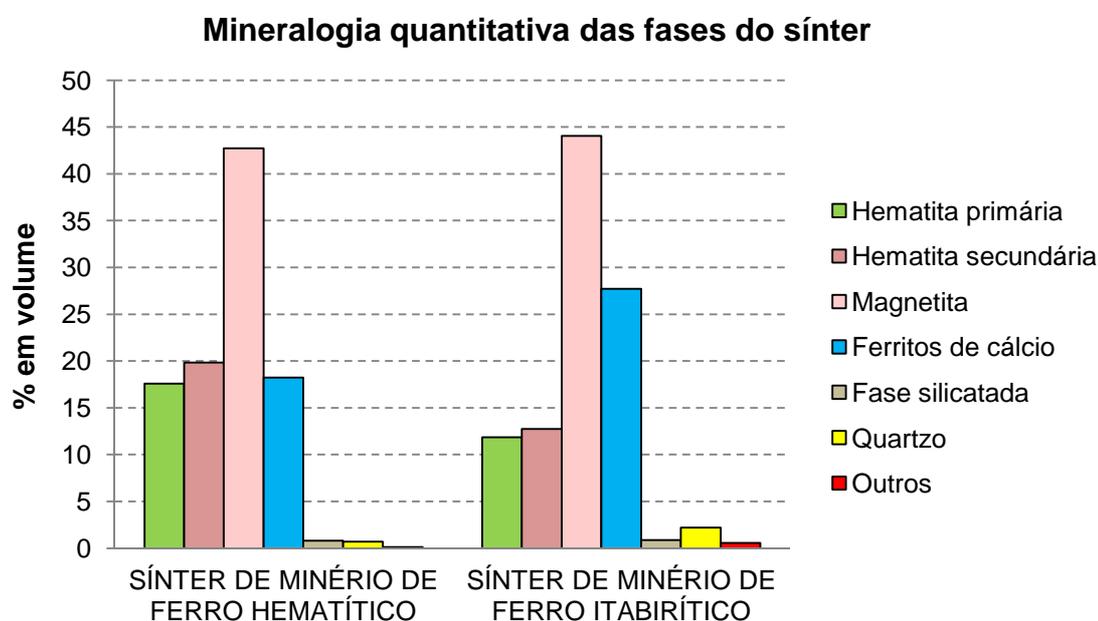


Figura 5.9 – Análise mineralógica quantitativa das fases dos sinteres produzidos a partir dos minérios de ferro hematítico e itabirítico friável da amostra global.

Conforme Figura 5.9, nota-se a presença significativa de magnetita e ferritos de cálcio. Os minerais dominantes são magnetita e hematita em uma matriz de escória vítrea.

As condições mineralógicas dos sinteres sofrem forte influência das condições operacionais. Segundo Azevedo *et al.* (2013), 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. A quantidade de combustível adicionado à mistura, gerando um ambiente redutor ou oxidante, pode formar mais magnetita ou hematita, respectivamente na estrutura do sinter.

O sinter gerado a partir do minério de ferro itabirítico obteve maior presença de ferritos de cálcio e silicatos. A maior ou menor ocorrência de ferritos de cálcio e silicatos está associada à reação sólido-líquido em torno de 1200°C, por reação interativa entre o Fe_2O_3 e o líquido gerado pela mistura $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{SiO}_2$.

A análise mineralógica permitiu observar um maior nível de porosidade e menor quantidade de silicatos de cálcio e magnetita (ambos de baixa redutibilidade) do sinter produzido com minério de ferro hematítico comparativamente ao minério de ferro itabirítico. Esses dados se mostram de acordo com o melhor IR apresentado pelo sinter produzido com minério de ferro hematítico. O RDI mostrou um resultado superior no sinter produzido a partir do minério de ferro itabirítico. Esse fato pode estar relacionado ao 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 (reoxidada), mais susceptível a degradação e dos ferritos de cálcio, que foram observados na análise mineralógica dos sinteres produzidos a partir desse minério de ferro.

Para o sinter produzido a partir do minério de ferro itabirítico, foi observado uma quantidade de partículas não reagidas de quartzo. Tal análise está condicionada a um estudo mais aprofundado sobre toda a composição da mistura, formas de ocorrências e distribuição do mineral.

A análise mineralógica qualitativa do sinter de minério de ferro hematítico (Figura 5.10) apresentou constituintes comuns tais como: hematita, magnetita, ferritos de cálcio e silicatos vítreos. Também foi identificada a presença de poros, porém não quantificada.

Conforme mostra a Figura 5.10a, foi encontrada a hematita secundária na microestrutura do sinter produzido através do minério hematítico para granulometria entre 25 e 50mm. A magnetita também aparece em grande quantidade, assim como os ferritos de cálcio.

Conforme mostra a Figura 5.10b, foi encontrada a hematita primária na microestrutura do sinter produzido através do minério hematítico para granulometria entre 10 e 25mm e esta se apresenta microporosa. A magnetita também aparece em grande quantidade na microestrutura em associação com os ferritos de cálcio. Observou-se também a presença de trincas na microestrutura.

Conforme mostra a Figura 5.10c, foi encontrada a hematita secundária em grande proporção na microestrutura do sinter produzido através do minério hematítico para

granulometria entre 4,75 e 10mm. A magnetita e os ferritos de cálcio também aparecem em grande quantidade na microestrutura.

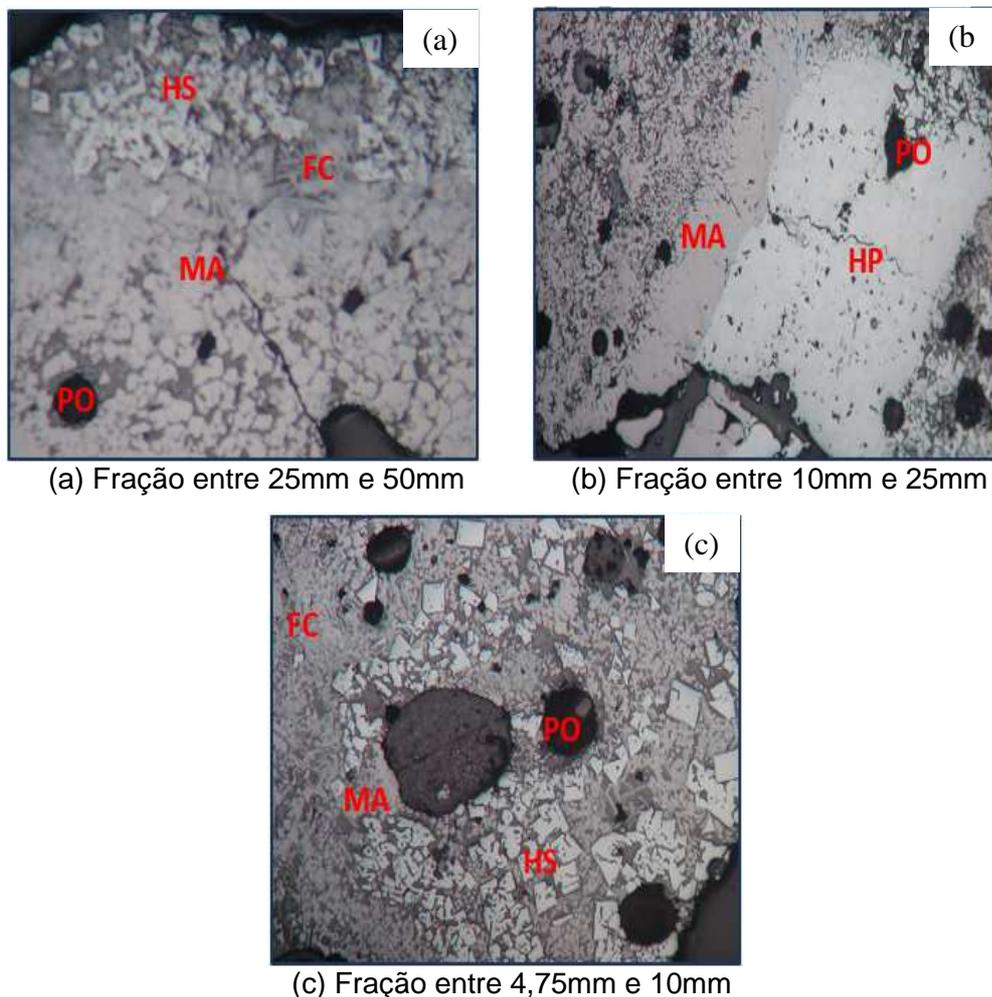


Figura 5.10 - Análise mineralógica qualitativa do sinter produzido a partir do minério de ferro hematítico friável. FC - Ferrito de Cálcio, HS - Hematita Secundária, HP - Hematita Primária, MA – Magnetita e PO – Poros. Imagem com aumento de 100x.

Em todas as micrografias analisadas do sinter de minério de ferro hematítico, observou-se que os poros estão aleatoriamente distribuídos na microestrutura do sinter, sob dimensões variadas (pequenos, médios e grandes).

Nas micrografias do sinter originado pelo minério de ferro hematítico, predominam cristais de magnetita, seguidos por hematita secundária e primária. Este conjunto encontra-se, às vezes, cimentado por minerais transparentes ou os minerais de ferro contêm inclusões dos mesmos. Dentre os cristais de hematita predominam os tipos

romboédricos (hematitas secundárias). Entretanto, algumas partículas da amostra mostram sinais de fusão. Fraturas e fissuras no sistema também são observadas.

A análise mineralógica do sinter de minério de ferro itabirítico (Figura 5.11) apresenta constituintes comuns, tais como: hematita, magnetita, ferritos de cálcio e silicatos vítreos. Também foi identificada a presença de poros.

Conforme mostra a Figura 5.11a, foi encontrada a hematita secundária na microestrutura do sinter produzido através do minério de ferro itabirítico para granulometria entre 25 e 50mm. Os ferritos de cálcio aparecem de forma predominante.

Conforme mostra a Figura 5.11b, foi encontrada a hematita secundária na microestrutura do sinter produzido através do minério itabirítico para granulometria entre 10 e 25mm, esta se apresenta microporosa. A magnetita também aparece em grande quantidade na microestrutura em associação com os ferritos de cálcio.

Conforme mostra a Figura 5.11c, foi encontrada a hematita primária e hematita secundária em grande proporção na microestrutura do sinter produzido através do minério de ferro itabirítico para granulometria entre 4,75 e 10mm. Os ferritos de cálcio também aparecem na microestrutura. Deve-se destacar ainda a presença de quartzo na microestrutura que não reagiu durante o processo de sinterização.

Em todas as micrografias analisadas do sinter de minério de ferro itabirítico, observou-se que os poros estão aleatoriamente distribuídos na microestrutura do sinter, sob dimensões variadas (pequenos, médios e grandes).

Nas micrografias dos sínteres produzidos com minério de ferro itabirítico, predominam cristais de magnetita, seguidos por ferritos de cálcio e hematita secundária. Este conjunto encontra-se, às vezes, cimentado por minerais transparentes ou os minerais de ferro contêm inclusões dos mesmos. Dentre os cristais de hematita predominam os tipos romboédricos (hematitas secundárias). Entretanto algumas partículas da amostra mostram sinais de fusão. Assim como para o sinter de minério de ferro hematítico, no sinter de minério de ferro itabirítico fraturas e fissuras no sistema também são observadas.

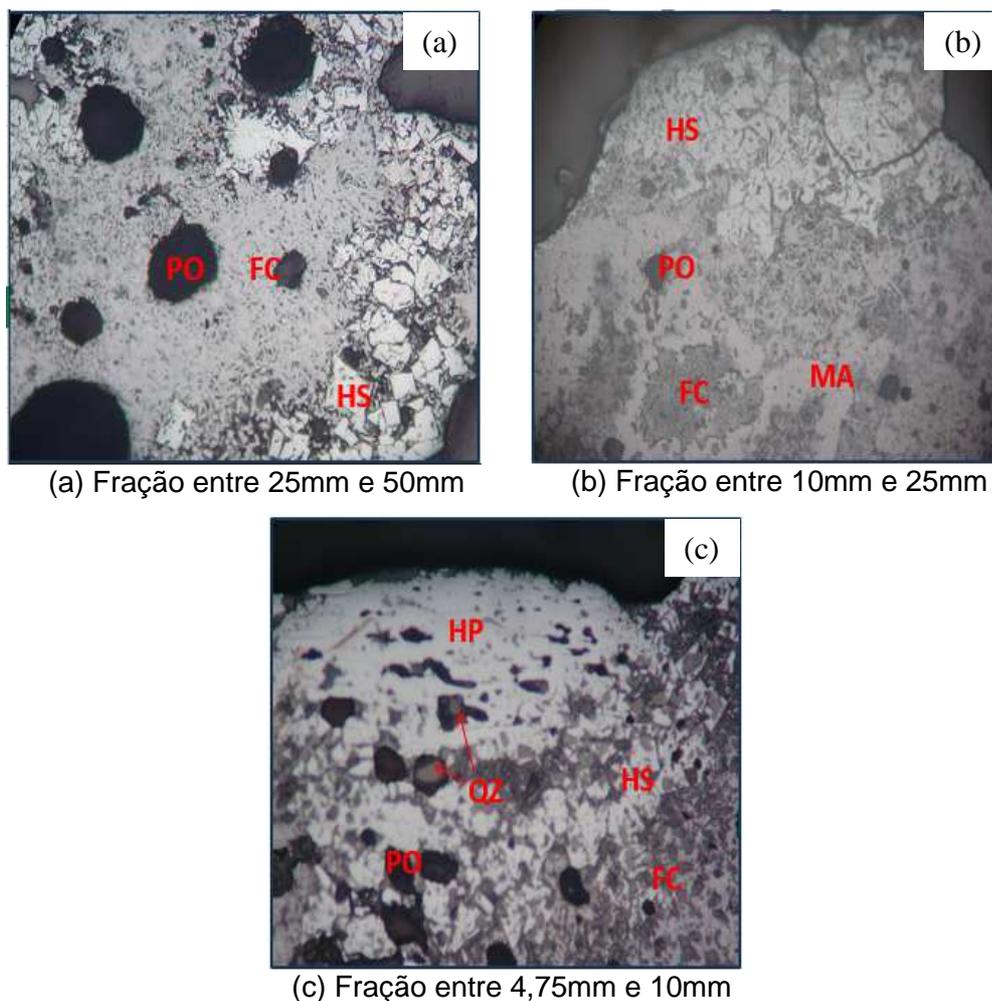


Figura 5.11 - Análise mineralógica do sinter produzido a partir do minério de ferro itabirítico friável. FC - Ferrito de Cálcio, HS - Hematita Secundária, MA – Magnetita, HP – Hematita Primária, QZ - Quartzo e PO – Poros. Imagem com aumento de 100x.

A composição mineralógica dos sínteres é parecida e, por isso, também não foram observadas grandes diferenças com relação às propriedades metalúrgicas, principalmente quanto à redutibilidade dos sínteres avaliados. As pequenas diferenças devem estar relacionadas à quantidade de algumas fases identificadas em ambos os sínteres, como por exemplo, os ferritos de cálcio e hematita secundária.

6. CONCLUSÕES

Os resultados de caracterização demonstraram que os minérios de ferro em estudo apresentam distinções químicas e mineralógicas. O minério de ferro itabirítico apresentou teores mais elevados de contaminantes, principalmente sílica, que foi de 6,41%, enquanto que o hematítico apresentou apenas 0,92%. O teor de ferro total se difere entre os minérios avaliados. O minério de ferro itabirítico apresentou menor teor de ferro total, que foi de 62,73%, enquanto que o hematítico apresentou 68,29%. O elevado teor de sílica e baixo teor de ferro total para o minério itabirítico é uma característica típica dos minérios de ferro itabiríticos. No minério de ferro hematítico, observou-se que a hematita lobular é a fase mineral predominante, enquanto que no minério itabirítico, a principal fase encontrada é a magnetita. Também foram observadas diferenças significativas quanto às características físicas desses minérios de ferro. Comparativamente ao minério de ferro hematítico, o minério de ferro itabirítico apresentou maiores valores de porosidade, o que deve explicar o seu menor desempenho de aglomeração a frio e maior capacidade de umidificação nas condições testadas.

Observou-se também que o desempenho do processo de sinterização foi influenciado pelas características intrínsecas dos minérios de ferro, tais como, mineralogia e características físicas. Os melhores níveis de velocidade de sinterização e produtividade obtidos na sinterização piloto foram com o minério de ferro hematítico. Esse comportamento pode ser explicado pelo favorecimento da permeabilidade do leito ao se utilizar o minério de ferro hematítico, que apresentou um melhor índice de aglomeração a frio. Quanto ao consumo de combustível não foram observadas variações significativas entre os minérios de ferro estudados.

Os resultados sobre as características dos sínteres obtidos demonstram que o sínter produzido a partir do minério de ferro hematítico é mais rico em ferro total, devido aos menores teores contaminantes presentes no minério de ferro hematítico em comparação com o sínter produzido a partir do minério de ferro itabirítico. Quanto à granulometria, os sínteres produzidos a partir dos dois minérios não apresentaram variações significativas.

Para os resultados do ensaio de tamboramento e teste de queda realizado para os sinteres produzidos com minérios individuais e misturas, foi observado que houve influência do maior volume de escória do sinter ($\text{SiO}_2 + \text{CaO}$) nas misturas dos minérios individuais comparativamente às misturas. Uma explicação para este fato é que o aumento do volume de escória favorece a resistência mecânica do sinter, pois leva a uma diminuição do percentual de hematita e o aumento do percentual de ferrito de cálcio acicular, em todas as formas.

Quanto aos parâmetros de qualidade metalúrgica, o sinter produzido a partir do minério de ferro hematítico apresentou melhores resultados de IR e RDI. Um fator observado na sua análise mineralógica é a menor quantidade de silicatos de cálcio e magnetita, ambos de baixa redutibilidade, confirmando a melhora do IR. Outro aspecto é a melhor resistência mecânica do sinter produzido a partir do minério hematítico verificado através do RDI. O RDI mostrou uma tendência de elevação no sinter produzido a partir do minério de ferro itabirítico. Esse fato pode ser explicado devido o maior nível térmico das regiões inferiores do leito de sinterização, favorecendo a formação de fases secundárias provenientes de precipitação da fase líquida e de reoxidação, como é o caso da hematita secundária (reoxidada), mais susceptível a degradação e dos ferritos de cálcio, que foram observados na análise mineralógica dos sinteres produzidos a partir desse minério de ferro.

Observa-se que os sinteres produzidos a partir dos minérios de ferro estudados apresentam características químicas, físicas, metalúrgicas e mineralógicas semelhantes. No entanto, constatou-se que, as condições (sobretudo com relação ao teor ideal de água na mistura) para o melhor desempenho do minério de ferro itabirítico na sinterização não devem ser as mesmas que para o minério de ferro hematítico, uma vez que os seus índices de umidificação e granulação são distintos. Essas condições também devem variar para diferentes misturas. Nesse sentido, estudos futuros ainda devem ser realizados visando identificar o teor ótimo de umidade para cada mistura visando seu uso na prática industrial.

Os resultados obtidos nesse trabalho permitiram concluir que o conhecimento prévio das características intrínsecas da mistura de minérios a sinterizar, que são definidos a partir do ROM e das rotas de processo estabelecidas no beneficiamento do *sinter feed*, contribuem para o conhecimento do desempenho na sinterização. Nesse

sentido, esse conhecimento poderá promover a otimização de parâmetros utilizados nos processos de sinterização e, conseqüentemente, um melhor desempenho de produtividade e maior qualidade física do síter produzido. Esse tipo de abordagem permite verificar a influência de novos tipos de minério de ferro no processo de sinterização, minimizando os efeitos do mesmo quando usado em escala industrial.

7. RELEVÂNCIA

Este trabalho contribui para o aumento do grau de conhecimento sobre a mudança no cenário mundial das características dos minérios de ferro finos, que na última década deixaram de ser minérios de ferro hematíticos compactos e passaram a ser hematitas friáveis, itabiritos ricos e em um passo seguinte, os itabiritos pobres e hidratados, havendo redução da relação hematita/itabirito. A qualidade química e física dos minérios de ferro vem se deteriorando ao longo do tempo, com os minérios cada vez mais finos, com menores teores de ferro e conseqüentemente mais contaminantes. O estudo indica que as condições do processo de sinterização para um melhor desempenho desses novos minérios de ferro disponíveis devem ser distintas daquelas condições normalmente empregadas para os minérios de ferro conhecidos e consumidos até então pela siderurgia brasileira.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dentro de uma perspectiva que engloba parâmetros técnicos e econômicos, tornou-se necessário o desenvolvimento de um modelo que considere propriedades físicas, químicas, mineralógicas e microestrutural, dentre outras, de tal forma que todas estas possam ser correlacionadas com as propriedades finais obtidas dos sínteres para consumo nos altos-fornos.

Considerando o consumo de misturas contendo *pellet feed* (minérios de ferro na fração menor que 0,149mm) nas sinterizações como uma necessidade para correção da qualidade química dos sínteres produzidos, é importante que se consiga obter uma mistura de minérios que garanta uma elevada produtividade nas máquinas de sínter e que o sínter produto atenda a qualidade requerida para consumo nos altos-fornos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO FILHO, G.M, TORRES, B. SESHADRI, V. Características de mistura para sinterização. Metalurgia – ABM, v42, n338, p 19 – 23, 1986.

AZEVEDO, R. N; DAVILA, L. S. C. et al.; Trabalho técnico interno: Redução do custo da mistura de minérios de ferro na sinterização. GERDAU, Ouro Branco, MG, Brasil, 2012.

AZEVEDO, R. N; DAVILA, L. S. C. *et al.* Curso de Sinterização. GERDAU OURO BRANCO, MG, Brasil, p. 32-66, 2013.

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.

COSTA, J.C.V. Caracterização do itabirito dolomítico da Mina de Conceição, visando aproveitamento como matéria-prima na siderurgia. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2013. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).

DAVILA, L. S. C. Trabalho técnico interno: Redução do custo da mistura de minérios de ferro na sinterização. GERDAU, Ouro Branco, MG, Brasil, 2012.

DUCA, J.G. Testes de sinterização de minérios ferrosos e não ferrosos. Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º seminário Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2014.

GOLDRING, D. C. and FRAY, T. A. – Characterization of iron ores for production of high quality sinter. - Ironmaking and Steelmaking, 1989, Vol. 16, Nº02.

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

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.

JANUZZI, A. – Caracterização Mineralógica, uma ferramenta de trabalho na Mina do Andrade. In: II Simpósio Brasileiro de Minério de ferro: caracterização, beneficiamento e aglomeração, 2, 1999, Ouro Preto. Anais. Ouro Preto: Associação Brasileira de Metalurgia (ABM) - p 22-32.

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).

PADULA, V. P. Caracterização tecnológica de um *sinter feed* hematítico contendo diferentes proporções e tipos de sílica nas frações aderentes, intermediárias e nucleantes. Ouro Preto. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral (PPGEM), 2009. (Dissertação de mestrado).

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

ROSIÈRE, C. A. A recristalização do minério de ferro da jazida do Pico do Itabirito no Quadrilátero Ferrífero e suas implicações genéticas. In: II Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 1983, Belo Horizonte. Boletim da SGB – Núcleo Minas Gerais. Belo Horizonte: SBG-MG,1983. v. 3. p.173-186.

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.

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, 85, 2003.

BIBLIOGRAFIA

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

ARAÚJO FILHO, G.M, TORRES, B. SESHADRI, V. Características de mistura para sinterização. Metalurgia – ABM, 1986. v.42, n.338, p.19 – 23.

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

COELHO, L. H. KANEKO, K. M., LIBANO, C.A. F., ALVES, S. A., VIEIRA, C. B. e ARAÚJO, F. G. S – Classificação Geosiderúrgica dos Principais tipos de Minérios de Ferro brasileiros – Sua Gênese e seus Produtos – XXXI Seminário de Redução de Minério de Ferro, Vol. 01, Novembro de 2000.

FURUI, T., KAWAZU, M., SHIMIZU, K., NAKATA, T. – The influence of Material Conditions on the quality of sinter - Nippon Steel Technical Report Overseas. Agosto 1975.

GLADKOV, N.A., GREBENKIN, N. A., DANICHEK, V. E. and TRON, L.V. – Influence of size and composition variability of sinter on its behaviour in reduction - Nizhii Tagil Iron and Steel Combine (NTMK) – Urals Scientific Research Institute of Ferrous Metals (URALNIICHERMET) – January 1984.

MEYER, K. Pelletizing of Iron Ores. Springer, Verlag Berlin, Heibelberg, and Verlag Stahleissen mbH, Düsseldorf, Germany, 1980. p.21-205.

MOLONEY, W. V and LENNOX, N. – Effect of Modified Mixing and Moisture on sintering – New Castle Steel Works – BHP Technical Bulletin – Vol 25, Nº01 – May 1981.

NOGUEIRA, P.R.S.M. Relação entre características das frações grossas do minério, produtividade e qualidade do sinter. Belo Horizonte. CPGEM/EEUFMG, 1987.

NOVIKOV, V.S, UDOVENKO, V. G., MARSUVERSKII, B. A., KACHULA, B. V., and SHALTON, V. A. Investigating behaviour of sinters of different basicity in blast furnace.- Nizhii Tagil Iron and Steel Combine (NTMK) – Urals Scientific Research Institute of Ferrous Metals (URALNIICHERMET) – January 1984.

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

PIMENTA, H.P; SESHADRI, V. – Characterization of structure of iron and its behavior during reduction at low temperatures. Ironmaking and Steelmaking, vol. 29, Nº3, p. 169-174, 2002.

PIMENTA, H.P; SESHADRI, V. – Influence of Al_2O_3 and TiO_2 on reduction and degradation behaviour at low temperatures. Ironmaking and Steelmaking, vol. 29, Nº3, p.175-179, 2002.

ROSIÈRE, C. A.; QUADE H.; SIEMES, H.; et alii. Um modelo para evolução microestrutural de minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte II – Trama, textura e anisotropia de susceptibilidade magnética – Geonomus, 1996. v.4, n.1, p.61 – 75.

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, 1997. p.295 – 302.

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, Escola de Minas de Ouro Preto, 2003. p.97-102.