

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

**“Avaliação de metodologias de simulação física  
do processo de sinterização”**

Autor: Ana Rita de Almeida Ribeiro Starling

Orientador: Professor Luiz Fernando Andrade de Castro

Maio/2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica Materiais e de Minas

Ana Rita de Almeida Ribeiro Starling

**“Avaliação de metodologias de simulação física do processo de sinterização”**

Dissertação de Mestrado apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Metalurgia Extrativa

Orientador: Professor Luiz Fernando Andrade de Castro

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2012

## Índice

Resumo.....	ix
Abstract .....	x
1 Introdução .....	1
2 Objetivos.....	4
3 Revisão Bibliográfica .....	5
3.1 CONCEITOS DO PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO.....	5
3.2 MECANISMOS DE SINTERIZAÇÃO: .....	5
3.2.1 Modelo de sinterização.....	6
3.3 HISTÓRIA DA SINTERIZAÇÃO.....	8
3.3.1 Sinterização em Batelada.....	10
3.3.2 Sinterização Contínua .....	10
3.4 SIDERURGIA .....	11
3.5 PROCESSOS DE AGLOMERAÇÃO .....	12
3.5.1 Sinterização do minério de ferro.....	13
3.5.2 Sinterização – Granulação .....	15
3.5.3 Sinterização – Fenômeno Físico e Químico.....	22
3.5.4 Sinterização – Equacionamento químico.....	23
3.6 MATÉRIAS-PRIMAS .....	26
3.6.1 Sinterização – Parâmetros de processo.....	34
3.6.2 Sinterização – Combustão.....	41
3.7 SINTER.....	47
3.7.1 Sinter abordagem mineralógica.....	47
3.7.2 Sinter abordagem química.....	49
3.7.3 Sinter abordagem física e estrutural.....	50
3.7.4 Sinter uma abordagem metalúrgica.....	51
3.8 SIMULAÇÃO FÍSICA .....	52
4 Metodologia.....	58
4.1 MISTURAS DE SINTERIZAÇÃO .....	59
4.1.1 Equacionamento de balanço de massa de sinterização .....	60
4.1.2 Identificação e caracterização de minérios.....	61
4.1.3 Qualidade visada do sinter .....	66
4.1.4 Conjunto de misturas de sinterização compostas.....	69
4.1.5 Seleção das misturas de sinterização.....	72
4.1.6 Detalhamento da composição das misturas de sinterização selecionada.....	76
4.2 PROGRAMAÇÃO DE ENSAIOS – OTIMIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO FÍSICA .....	83
4.3 .METODOLOGIAS DE SIMULAÇÃO FÍSICA.....	84
4.3.1 Produção de finos de retorno.....	85
4.3.2 Mistura e granulação.....	85
4.3.3 Sinterização.....	87
4.3.4 Metodologia Mini-pot tests .....	88
4.3.5 Metodologia Sinter Pot tests .....	90
4.4 VARIÁVEIS DE PROCESSO MONITORADAS NAS SIMULAÇÕES .....	91
4.4.1 Caracterização do sinter.....	95
4.5 DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO CORRELACIONAL .....	96
5 Resultados e Discussões .....	97

5.1	METODOLOGIAS DE SIMULAÇÃO FÍSICA: MINI POT TEST VS SINTER POT TEST.....	97
5.1.1	<i>Mistura e granulação.....</i>	98
5.1.2	<i>Sinterização.....</i>	102
5.1.3	<i>Variáveis de processo de sinterização – Comparação entre as metodologias.....</i>	116
5.1.4	<i>Variáveis de processo de sinterização – Validação da metodologia de simulação física do mini pot test.....</i>	125
5.1.5	<i>Produto de sinterização.....</i>	126
5.1.6	<i>Correlação entre metodologias de simulação física.....</i>	132
6	Conclusões.....	139
7	Recomendações:.....	142
8	Referência Bibliográfica.....	143
9	Anexo 1.....	148

## Índice de Figuras

Figura 3.1: Modelo de adesão de duas partículas – estágio inicial da sinterização. (a) sem retração da camada (b) com retração da camada (KANG, L, 2005) <sup>(4)</sup> .....	7
Figura 3.2: Desenho esquemático da sinterização proposta por Thomas Huntington e F herberlein (BALL, D.F et al, 1973) <sup>(6)</sup> .....	9
Figura 3.3: Desenho esquemático da sinterização proposta Greenawalt (BALL, D.F et al, 1973) <sup>(6)</sup> .....	10
Figura 3.4: Desenho esquemático da sinterização proposta Dwight-Lloyd (HINKLEY, J. et al, 1994) <sup>(7)</sup> .....	11
Figura 3.5: Fotos microscópicas da formação de núcleos aglomerantes (LITSTER, J.D. E .WATERS, A.G, 1988) <sup>(19)</sup> .....	20
Figura 3.6: Desenho esquemático do mecanismo de granulação (LITSTER, J.D. E .WATERS, A.G, 1988) <sup>(19)</sup> .....	21
Figura 3.7: Desenho esquemático das zonas do processo de sinterização .....	23
Figura 3.8: Minérios de ferro ofertados para o mercado .....	28
Figura 3.9: Estimativa dos fenômenos de fusão dos sinter feed no processo de sinterização (LI HONG-GE et al, 2011) <sup>(31)</sup> .....	30
Figura 3.10: Perfil de temperatura em função da altura do leito do processo de sinterização de diferentes tipos de misturas de sinterização avaliadas (LI HONG-GE et al, 2011) <sup>(31)</sup> .....	31
Figura 3.11: O gráfico mostrado quantifica a sensibilidade do modelo e do processo quanto aos parâmetros avaliados (MITTERLERHNER, J et al, 2004) <sup>(9)</sup> .....	37
Figura 3.12: Diagrama esquemático do deslocamento da frente de queima do processo de sinterização (WON YANG et al, 2003) <sup>(36)</sup> .....	42
Figura 3.13: Diagrama esquemático de um ensaio físico de sinterização (BALL, D.F et al, 1973) <sup>(6)</sup> .....	53
Figura 4.1: Gráfico da caracterização química dos minérios amostrados para a composição das misturas de sinterização .....	63
Figura 4.2: Gráfico da Caracterização granulométrica dos minérios amostrados para as composições das misturas de sinterização. ....	64
Figura 4.3: Gráfico da caracterização granulométrica do conjunto de misturas compostas .....	70
Figura 4.4: Gráfico da caracterização química do conjunto de misturas compostas .....	71
Figura 4.5: Gráfico da caracterização granulométrica das misturas selecionadas para a realização do programa de ensaio do trabalho. ....	73

Figura 4.6: Caracterização química das misturas selecionadas para a realização do programa de ensaio do trabalho .....	73
Figura 4.7: Gráfico da composição das misturas a partir da classificação dos minérios quanto suas propriedades químicas e físicas. ....	77
Figura 4.8: Gráfico da distribuição granulométrica das cinco misturas selecionadas para a realização das simulações físicas.....	78
Figura 4.9: Dimensionamento do equipamento de queima da metodologia mini pot test .....	89
Figura 4.10: Dimensionamento do equipamento de queima da metodologia sinter pot test ...	90
Figura 5.1: Gráfico da distribuição granulométrica dos grânulos verdes formados de acordo com a metodologia do mini pot test.....	99
Figura 5.2: Gráfico da distribuição granulométrica dos grânulos verdes formados de acordo com a metodologia do pot test. ....	99
Figura 5.3: Gráfico da comparação da percentagem passante de grânulos verdes menores que 5 mm formados pela aplicação da metodologia do mini pot test e a percentagem formada pela aplicação da metodologia do pot test.....	102
Figura 5.4: Gráfico da comparação entre a massa de mistura carregada no pote da metodologia do sinter pot test com a massa de mistura carregada no pote da metodologia do mini pot test. ....	104
Figura 5.10: Obtenção da umidade ótima da Mistura A test .....	112
Figura 5.11: Obtenção da umidade ótima da Mistura B test .....	113
Figura 5.12: Obtenção da umidade ótima da Mistura C.....	113
Figura 5.13: Obtenção da umidade ótima da Mistura D.....	114
Figura 5.14: Obtenção da umidade ótima da Mistura E .....	114
Figura 5.15: Comparação entre o tempo gasto para a sinterização das misturas sob as diretrizes de cada uma das metodologias de simulação física. ....	117
Figura 5.16: Comparação entre as velocidades da frente de queima da sinterização das misturas sob as diretrizes de cada uma das metodologias de simulação física. ....	118
Figura 5.17: Comparação entre o consumo de combustível na sinterização das misturas sob as diretrizes de cada uma das metodologias de simulação física.....	119
Figura 5.17: Comparação entre a resistência a permeabilidade do leito de sinterização das misturas sob as diretrizes de cada uma das metodologias de simulação física. ....	122
Figura 5.18: Comparação entre a produtividade da sinterização das misturas sob as diretrizes de cada uma das metodologias de simulação física. ....	123

Figura 5.19: Massa de bolo de sinter produzido na sinterização das cinco misturas de sinterização- Metodologia do mini pot test. ....	126
Figura 5.20: Massa de bolo de sinter produzido na sinterização das cinco misturas de sinterização - Metodologia do sinter pot test. ....	127
Figura 5.23: Comparação entre o índice de tamboramento dos produtos de sinterização das misturas sob as diretrizes de cada uma das metodologias de simulação física. ....	128
Figura 5.24: Comparação do teor de alumina do sinter calculado no balanço de massa com o teor de alumina do sinter obtido pelas metodologias de simulação física. ....	129
Figura 5.25: Comparação do teor de sílica do sinter calculado no balanço de massa com o teor de sílica do sinter obtido pelas metodologias de simulação física. ....	130
Figura 5.26: Comparação da basicidade do sinter calculado no balanço de massa com a basicidade do sinter obtido pelas metodologia de simulação física. ....	130
Figura 5.27: Comparação entre as metodologias de simulação física - Teor de sílica do sinter .....	131
Figura 5.28: Comparação entre as metodologias de simulação física - Teor de alumina do sinter. ....	131
Figura 5.29: Comparação entre as metodologias de simulação física - Basicidade do sinter. ...	132
Figura 5.30: Correlação entre as metodologias de simulação física – Metodologia do mini pot test VS Metodologia do sinter pot test – Consumo de combustível. ....	133
Figura 5.31: Correlação entre as metodologias de simulação física – Metodologia do mini pot test VS Metodologia do sinter pot test - Produtividade. ....	135
Figura 5.32: Correlação entre as metodologias de simulação física – Metodologia do mini pot test VS Metodologia do sinter pot test – Índice de tamboramento. ....	136

## Índice de Tabelas

Tabela 4.1: Identificação e determinação da origem dos minérios utilizados na composição das misturas de sinterização. ....	62
Tabela 4.2: Composição das misturas selecionadas para a realização do programa de ensaio do trabalho. ....	75
Tabela 5.1: Comparação entre os valores dos parâmetros operacionais assumidos durante a realização das simulações físicas sob a metodologia do pot test e os valores assumidos nas simulações física sob a metodologia do mini pot test. ....	105
Tabela 5.2: Análise de variância da equação de regressão do consumo de combustível entre as duas metodologias de simulação física. ....	134
Tabela 5.3: Análise de variância da equação de regressão da produtividade da sinterização entre as duas metodologias de simulação física. ....	136
Tabela 5.4: Análise de variância da equação de regressão para o índice de tamboramento entre as duas metodologias de simulação física. ....	137
Tabela 9.1: Análise química dos minérios disponíveis para a composição das misturas de sinterização. ....	148
Tabela 9.2: Qualidade química dos aditivos e do combustível utilizado na composição das misturas. ....	149
Tabela 9.3: Qualidade dos produtos de sinterização obtidos pelo cálculo de balanço de massa e nas simulações física das metodologia do sinter pot test e do mini pot test. ..	149
Tabela 9.4: Variáveis de processo de sinterização das misturas sob diretrizes da metodologia do sinter pot test e sob a metodologia do mini pot test. ....	150
Tabela 9.5: Composição das misturas de sinterização. ....	151

## Resumo

O processo de aglomeração de partículas é crucial para o êxito da produção de aço via rota alto-forno. A sinterização se destaca entre os processos de aglomeração devido a maior flexibilização deste processo. A composição da mistura de sinterização interfere diretamente no desempenho do processo e na qualidade do sinter obtido.

Este trabalho avaliou os impactos da variação na composição e na qualidade de misturas no processo de sinterização a partir de ensaios de simulação física. Considerando duas metodologias de simulação física de diferentes escalas este trabalho busca, além da validação da metodologia de menor escala pouco conhecida, suprir informações a cerca das relações, semelhanças e limitações entre elas através da comparação entre os resultados obtidos nos ensaios.

De acordo com os ensaios comparativos feitos a metodologia de pequena escala mostrou-se robusta e capaz de reproduzir a sinterização tanto na previsão do comportamento dos parâmetros de processo quanto na previsão da qualidade do sinter dada alguma variação na mistura de sinterização. Mas os resultados mostram falhas na previsão da qualidade física e indicam também deficiências na reprodução de qualidades metalúrgicas do sinter na aplicação da metodologia de pequeno porte.

O mesmo comportamento é observado na definição das correlações. Os estudos indicam consistência na previsibilidade de parâmetros de processo na aplicação da metodologia de menor escala (mini pot test). Apesar de não representarem 100% dos dados as equações desenvolvidas tanto para a produtividade da sinterização e quanto para o consumo de combustível podem ser usadas para prever o comportamento destas variáveis na aplicação da metodologia do sinter pot test a partir da simulação física das misturas sob a metodologia do mini pot test. Mas a metodologia do mini pot test apresenta deficiência na previsão de propriedades físicas e metalúrgica do produto formado. Isto pode ser confirmado pela baixa correlação obtida neste trabalho para a previsão do índice de tamboramento.

Assim, mesmo apresentando-se como boa substituta da metodologia do sinter pot test para na previsão do comportamento de parâmetros de processo, a metodologia do mini pot test apresenta fraquezas quanto na previsão de propriedades física e metalúrgica do sinter, não se apresentando como uma alternativa robusta na reprodução de impactos na qualidade do sinter. Assim, principalmente para a determinação de qualidade do sinter ainda a aplicação da metodologia do sinter pot test não deve ser dispensada.

## **Abstract**

The process of agglomeration of particles is crucial for the successful production of steel by blast furnace. The sintering stands out among the processes of agglomeration due to the greater flexibility of this process. The composition of mixtures acts directly on the sintering process performance and on the sinter quality.

This study appreciates the impacts of variation in the composition and quality of mixtures in sintering process by physical simulation. This job search beyond the small scale method validation and provide information about the relationships, similarities and constraints between both methods by comparing the results obtained in the tests

Small-scale method was found to be robust and capable to reproduce sintering process parameters and sinter quality due to mixture variation. Results show failures in physical quality predicts and also indicate some deficiencies on metallurgical properties.

The same behavior is observed in the definition of the correlations. The equations developed for the productivity and for fuel consumption can be used to predict the behavior on the bigger methodology doing only physical simulation under small scale method.

Thus, even appearing as a good substitute for the prediction of process parameters, small scale method has weaknesses as in the prediction of physical and metallurgical properties of sinter.

## 1 Introdução

Sinterização é um processo de aglomeração de partículas finas de minério de ferro. O produto resultante da sinterização é denominado sinter. O processo de aglomeração de partículas é crucial para o êxito da produção de aço via rota alto-forno dada às limitações que este tipo de reator apresenta em relação à presença de material fino. Elevada quantidade de material fino no alto-forno reduz a permeabilidade do gás dentro do reator e a velocidade das reações de redução e produção do gusa.

A sinterização se destaca entre os processos de aglomeração devido a sua maior flexibilização quanto à qualidade dos produtos obtidos. O processo permite variação na matriz de sinter feeds e ajustes na qualidade do produto através do controle da participação de aditivos, fundentes e combustíveis na mistura de sinterização. Isto possibilita menor variação do processo de redução e nas propriedades do aço a ser produzido.

Além de o sinter apresentar granulometria mais grossa e homogeneia do que as partículas de sinter feed sua redutibilidade e resistência mecânica reforçam os benefícios de utilização deste produto como carga metálica do alto-forno para a produção de gusa. Estes benefícios levam a maioria das usinas mundiais operarem com carga de sinter superior a 60%. Este é trabalho busca analisar impactos no processo de sinterização dada a importância e a larga utilização de sinter nos processos de fabricação de aço.

O processo de sinterização se inicia com a composição das matrizes de minérios seguida pela composição das misturas de sinterização definidas e ajustadas de acordo com a qualidade desejada do produto. Após a composição da mistura de sinterização as partículas são aglomeradas a frio através da adição de água à mistura de sinterização composta. Os aglomerados formados no processo de sinterização são então submetidos a um processo de queima em que o ponto de fusão é parcialmente atingido. A semi-fusão redutora oxidante da carga modifica as propriedades físicas e metalúrgicas da mistura de sinterização formando o sinter.

O desempenho do processo de sinterização e a qualidade do sinter obtido são diretamente influenciados pela composição da mistura de sinterização. As misturas são geralmente compostas por uma diversidade de sinter feeds os quais apresentam entre si variações químicas, físicas, metalúrgicas e mineralógicas

A sensibilidade da sinterização às alterações da matriz de sinter feeds e conseqüentemente à mistura de sinterização leva a necessidade de se identificar e quantificar o impacto destas variações no processo antes da aplicação no processo industrial, reduzindo assim prejuízos operacionais e financeiros.

Uma boa alternativa para se avaliar os impactos das variações nas matrizes de sinter feed na sinterização é a aplicação de metodologias de simulações físicas. Essas metodologias permitem a reprodução do processo de sinterização em menor escala. Além de auxiliar a manutenção da estabilidade do processo industrial a aplicação de metodologia de simulações físicas reduz o risco tecnológico de variações de parâmetros da sinterização ou até mesmo na composição das misturas de sinterização a um baixo custo.

Assim tanto variações de qualidade de sinter feeds ofertados as siderúrgicas quanto uma descontinuidade no fornecimento de algum produto ou até mesmo uma eventual oferta de produto de baixo custo pode ser avaliada através da realização das simulações físicas antes da implantação da mudança industrialmente.

As metodologias de simulação física de sinterização apesar de muito apresentarem montagens muito semelhantes em geral se diferem pelo dimensionamento de seus equipamentos principalmente dos tambores rotativos e equipamentos em que ocorre a queima das misturas.

Diversos estudos utilizam de metodologias de simulação física na verificação de ajustes a serem aplicados na planta industrial. Estas metodologias também surgem como ferramentas poderosas na calibração e validação de modelos matemáticos propostos também com objetivo de estimar variações no processo industrial.

Apesar do uso de simulações físicas difundido para avaliação de misturas e/ou do processo de sinterização pouco se discute a cerca das semelhanças ou distorções atribuídos à variação do dimensionamento dos equipamentos tanto em relação a etapa de granulação quanto em relação a etapa de queima da mistura. As abordagens são sempre na linha de descrever e avaliar uma metodologia de simulação física perante as condições propostas. Raramente busca-se relações comparativas entre duas diferentes metodologias ou a definição de limitações ou ganhos da utilização de uma metodologia em detrimento de outra.

A metodologias de escala maior (piloto) escolhida contempla um pote com capacidade de queimar aproximadamente 40 quilos de mistura de sinterização por queima. Já a metodologia de menor escala contempla um pote que comporta apenas aproximadamente 10 quilos de mistura. Esta metodologia propõe semelhança de respostas processo consumindo em torno de apenas 20% da massa de mistura consumida em metodologias de simulações físicas em larga escala.

O menor consumo de amostra observado na aplicação de metodologias de menor escala surge como um grande atrativo da aplicação destas. Dada a dificuldade na obtenção de amostras de sinter feeds uma menor demanda por simulação física permite a avaliação de um domínio de variações na matriz de sinterização muito maior. A aplicação de metodologia de simulação física de menor escala permite a geração de ampliação do conhecimento do impacto das variações no processo. Mas, por serem menos difundidas, a aplicação destas metodologias de menor escala induzem a um maior grau de incerteza em relação a previsibilidade na reprodução de impactos operacionais dada uma variação na mistura de sinterização.

Este trabalho busca o aprofundamento do conhecimento e análise de parâmetros operacionais de uma metodologia de simulação física de pequena escala e visa suprir informações a cerca das relações, semelhanças e limitações de duas metodologias simulação física diferente através da comparação entre os resultados obtidos em ensaios realizados tanto sob as diretrizes de uma metodologia de menor escala quanto os obtidos através da aplicação de uma metodologia de maior escala.

A partir dos resultados dos ensaios e da avaliação do comportamento das variáveis de processo obtidas tentar-se-á obter correlações entre as principais variáveis do processo de sinterização de ambas as metodologias de simulação física abordadas.

As correlações permitirão a previsão do comportamento das misturas frente à aplicação da metodologia de maior escala apenas com a realização de ensaios que realizados sob diretrizes da metodologia de menor escala. O desenvolvimento e aplicação deste processo possibilitará a ampliação do conhecimento relativo aos impactos causados por variações em misturas de sinterização.

## 2 Objetivos

- Avaliar a metodologia de simulação física de pequena escala denominada mini pot test através de:
  - ✓ avaliação e identificação de impactos tanto em parâmetros do processo de sinterização quanto na qualidade de seu produto devido a variações na composição das matrizes de sinterização;
  - ✓ comparação entre os parâmetros de processo e produtos obtidos nas simulações físicas realizadas seguindo as diretrizes da metodologia do mini pot test e os parâmetros obtidos nas simulações regidas pela metodologia do sinter pot test;
  - ✓ determinação de similaridades e correlações entre as principais variáveis do processo de sinterização obtidas na aplicação das duas metodologias abordadas.

### **3 Revisão Bibliográfica**

Para a avaliação dos resultados das simulações físicas torna-se importante uma revisão bibliográfica do processo de sinterização com objetivo de identificar peculiaridades e parâmetros que auxiliarão na compreensão dos ensaios e de seus resultados.

Nesta revisão bibliográfica ainda serão revistas metodologias de simulações físicas na tentativa de embasar e justificar semelhanças ou diferenças no comportamento da sinterização das misturas perante as diretrizes das duas metodologias de simulação física abordadas.

#### **3.1 Conceitos do Processo de Sinterização**

O processo de sinterização é caracterizado pela aglomeração de finos e a formação de sólidos porosos a partir de um processo de granulação seguido de tratamento térmico a pressão atmosférica dos finos.

Sinterização é um processo utilizado na produção de produtos metálicos ou cerâmicos de densidade controlada (KANG, L, 2005)<sup>(1)</sup>.

A sinterização em geral visa a produção de produtos com qualidade controlada. As principais propriedades controladas são: tamanho de grãos, distribuição granulométrica, densidade, porosidade.

#### **3.2 Mecanismos de sinterização:**

O processo de sinterização é o mais importante processo de aglomeração de finos da indústria. O produto resultante deste processo apresenta propriedades físico-químicas e físico-mecânica específicas, determinadas pela formação estrutural do produto da sinterização.

O mecanismo de sinterização foi historicamente definido baseado em modelos cujos conceitos de organização abordam a dimensão discreta das partículas. (OLEVSKY, E. A, 1998) <sup>(2)</sup>. Ou seja, o produto da sinterização é resultado do processo de adesão entre

as partículas sendo seu crescimento promovido pelo contato e coalescência entre delas. Dessa forma a interação entre as partículas é definida apenas como interações cinéticas locais.

Este processo ocorre sob condições em que ainda não é possível haver fusão ou em que é impedida a fluidização de toda a camada devido ao curto período que a temperatura de fusão é atingida (ARAUJO, L. A,1997) <sup>(3)</sup>. “O fortalecimento das ligações entre as partículas resulta em um processo de difusão na fase sólida, ou colagem, através de amolecimento superficial, fusão parcial e formação de escória” (ARAUJO, L. A,1997)<sup>(3)</sup>.

Uma vertente mais moderna considera além dos conceitos inerente ao processo de sinterização e à cinética das partículas alguns fatores macroscópicos (OLEVSKY, E. A, 1998) <sup>(2)</sup>.

### ***3.2.1 Modelo de sinterização***

Modelos de sinterização baseado na descrição do comportamento das partículas presentes nas misturas são bastante complexos (KANG, L, 2005) <sup>(4)</sup>. Alguns modelos tentam descrever e justificar o desempenho do processo de sinterização a partir de simplificações e/ou a partir da descrição de apenas algumas variáveis de influência.

A complexidade geométrica entre as partículas que compõe a mistura de sinterização é muito grande. Uma forma de simplificar a geometria e construir um modelo de comportamento da sinterização baseado nesta variável é assumir que todas as partículas são esféricas e do mesmo tamanho.

A partir desta simplificação o mecanismo da sinterização pode ser representado pela adesão de duas partículas conforme figura 3.1. Neste modelo a resistência do produto de sinterização é determinada pelo tamanho e geometria da ligação entre as partículas.

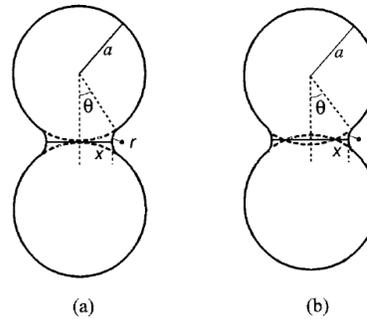


Figura 3.1: Modelo de adesão de duas partículas – estágio inicial da sinterização. (a) sem retração da camada (b) com retração da camada (KANG, L, 2005)<sup>(4)</sup>.

Este modelo considera duas condições do processo de sinterização. O primeiro sem considerar a contração da mistura ao longo da sinterização, figura 3.1a e o segundo considerando a contração, figura 3.1b.

Desconsiderando a contração ao longo da sinterização a distância entre as partículas não muda e há aumento da intensidade da ligação. Já considerando a retração há uma transferência de material entre as partículas e uma consequente diminuição da distancia entre as partículas (KANG, L, 2005)<sup>(4)</sup>.

### *Modelo de difusão*

Difusão é o principal mecanismo da sinterização. Este mecanismo está relacionado com movimento dos átomos, ou seja, com a cinética dos átomos. Modelos que buscam quantificar a interferência deste parâmetro considera que o movimento dos átomos pode ser atribuído ao transporte de massa devido a diferença de potencial químico e ao gradiente de espaços vazios na estrutura do produto (KANG, L, 2005)<sup>(4)</sup>.

### 3.3 História da Sinterização

A sinterização é uma dos mais importantes processos de aglomeração da indústria metalúrgica e ceramista. É na verdade uma das mais antigas tecnologias humanas. Desde a era pré-histórica o processo de produção de materiais cerâmicos contemplava a aplicação de energia térmica (KANG, L, 2005)<sup>(1)</sup>. Técnicas de produção de peças de metal a partir de finos de minério por sinterização datam do começo da civilização humana. A utilização do ferro ocorre desde os egípcios 3–4000 b.c (HOCKING, M. B, 2005)<sup>(5)</sup>.

Meteoritos e o aquecimento de materiais rochosos ricos em ferro presentes no solo foram provavelmente os precursores da utilização do ferro como matéria prima para a fabricação de ferramentas (HOCKING, M. B, 2005)<sup>(5)</sup>.

O primeiro equipamento industrial de sinterização foi desenvolvido por volta de 1890 (BALL, D.F et al, 1973)<sup>(6)</sup>. “Em 1897, na Inglaterra, Thomas Huntington e F herberlein com o objetivo oxidar e aglomerar os minérios obteve uma patente para a ustulação de minério de chumbo contendo enxofre em uma grelha descontínua, através da queima do carvão de madeira e soprando o ar de combustão de baixo para cima.” (ARAUJO, L. A,1997) <sup>(3)</sup>. Finos de minérios misturados com combustível foram carregados em um leito de carvão dentro de um recipiente. O ar forçado contra a camada provocou a sinterização do leito (BALL, D.F et al, 1973)<sup>(6)</sup>. A figura 3.2 mostra um desenho esquemático da sinterização proposta por Thomas Huntington e F herberlein.

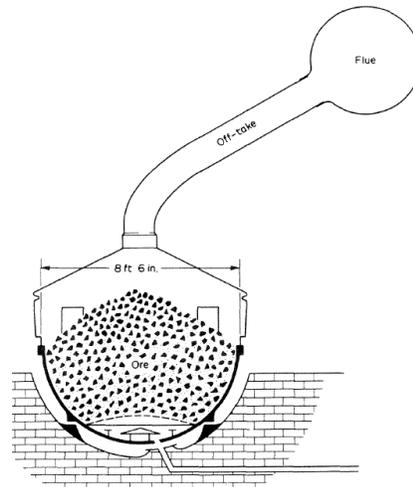


Figura 3.2: Desenho esquemático da sinterização proposta por Thomas Huntington e F. Herberlein (BALL, D.F et al, 1973)<sup>(6)</sup>.

No início do século vinte foi desenvolvido duas diferentes rotas para o processo de sinterização.

A primeira rota, em menor escala, considera o processo de sinterização em batelada. A máquina de sinterização mais famosa desenvolvida a partir dos conceitos de sinterização em batelada foi a máquina cujo layout foi projetado por J.E Greenwalt nos estados unidos (BALL, D.F et al, 1973)<sup>(6)</sup>.

A segunda rota considera o processo contínuo de sinterização. Este foi desenvolvido entre 1903 a 1906 por Dwight and Lloyd no México para a sinterização de cobre. Logo depois algumas plantas com o mesmo layout foram construídas para a sinterização de minério de ferro. Hoje em dia as máquinas de sinterização contínua são utilizadas em larga escala (BALL, D.F et al, 1973)<sup>(6)</sup>.

Apenas após 1940 a sinterização começou a ser estudada científica e fundamentalmente. Desde então importantes desenvolvimentos deste processo vem sendo atingido.

### 3.3.1 Sinterização em Batelada

#### *Greenawalt*

A figura 3.3 mostra um desenho esquemático do layout da máquina de sinter desenvolvida por Greenawalt. A mistura de sinterização é alimentada na parte superior da máquina. Após o carregamento é acionada os queimadores. Quando a ignição se completa o queimador é retirado e ar é succionado ao longo do leito até que a finalização da sinterização. A maior limitação desta rota é o aumento da maquina de sinter dada a necessidade de se obter uniformidade na ignição (BALL, D.F et al, 1973)<sup>(6)</sup>.

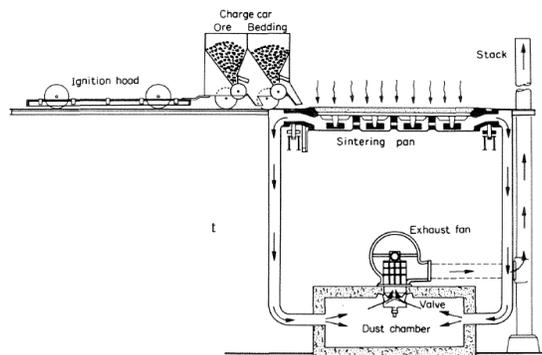


Figura 3.3: Desenho esquemático da sinterização proposta Greenawalt (BALL, D.F et al, 1973)<sup>(6)</sup>.

### 3.3.2 Sinterização Contínua

#### *Dwight-Lloyd*

A principal característica desta rota de sinterização é a grelha móvel. Na parte inferior da grelha existe um sistema de exaustão que succiona o ar quente, após a ignição, ao longo da camada de mistura, provocando a sinterização do leito. A figura 3.4 mostra um

desenho esquemático do layout da máquina de sinter desenvolvida por Dwight-Lloyd (BALL, D.F et al, 1973)<sup>(6)</sup>.

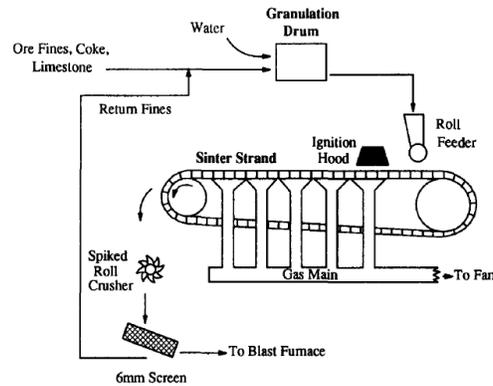


Fig. 1. Schematic of the ferrous sintering process.

Figura 3.4: Desenho esquemático da sinterização proposta Dwight-Lloyd (HINKLEY, J. et al, 1994)<sup>(7)</sup>.

### 3.4 Siderurgia

Alumínio e ferro são os metais mais abundantes na crosta terrestre. Tanto o ferro quanto o alumínio são raramente encontrados na natureza sob a forma metálica (HOCKING, M. B, 2005)<sup>(5)</sup>. A larga utilização de ferro e ligas deste metal culmina em uma produção de ferro metálico maior do que a soma da produção de todos os metais utilizados pelo homem (HOCKING, M. B, 2005)<sup>(5)</sup>.

A produção anual de aço e ligas de ferro gira em torno de 93% da produção total de metais no mundo. A grande abundância de ferro juntamente com a facilidade de redução deste metal e a consolidação de tecnologias de produção contribui para a redução do custo de produção de ferro. A utilização em larga escala do ferro ocorre devido a grande versatilidade e custo da produção deste metal e devido às boas propriedades mecânicas como resistência, alto ponto de fusão, ductibilidade deste metal (NASSARALLA, C. L, 2001)<sup>(8)</sup>. “Aproximadamente 57% da produção de aço segue a rota de Alto-forno” (NASSARALLA, C. L, 2001)<sup>(8)</sup>. A carga metálica adicionada no alto-forno pode ser dividida em sólidos, líquidos e gases. A carga metálica sólida é composta basicamente

de minérios de ferro oxidados, fundentes e coque metalúrgico. Existem três fontes principais de minério de ferro oxidado: pelotas, sinter e granulados. Como produto o alto-forno produz gusa, escória e gases.

### 3.5 Processos de aglomeração

“O escopo da aglomeração é melhorar a permeabilidade da carga e o contato entre os sólidos e o gás redutor e assim baixar a taxa de utilização de coque e aumentar a velocidade da redução”. “Outra característica importante do processo de aglomeração é a diminuição da quantidade de poeiras arrastadas para o sistema de gás do alto-forno devido a utilização de sinter em lugar a carga direta de minério de ferro” (BALL, D.F et al, 1973)<sup>(6)</sup>.

O Alto forno exige uniformidade da carga, isenção de finos, faixa granulométrica estreita e suficiente resistência mecânica para assegurar boa permeabilidade (BALL, D.F et al, 1973)<sup>(6)</sup>.

A carga do alto-forno deve apresentar boa reductibilidade e elevado teor de ferro para que a performance do reator seja estável e o consumo de combustível seja minimizado.

“Um bom aglomerado deve resistir a elevadas temperaturas, forças e pressões internas do alto-forno sem amolecer ou decrepitar” (BALL, D.F et al, 1973)<sup>(6)</sup>.

Além destas características busca-se um aglomerado com alto teor de ferro, baixo teor de fósforo e enxofre, pequena quantidade de partículas finas ou muito grossas.

O processo de sinterização garante as características exigidas da carga metálica pelo reator siderúrgico (MITTERLERHNER, J et al, 2004)<sup>(9)</sup>. Este processo se destaca entre os processos de aglomeração dada maior flexibilização na qualidade dos produtos visados. O processo permite variação na matriz de sinter feeds e também permite ajustes na qualidade do produto através do controle da participação de aditivos, fundentes e combustíveis na mistura de sinterização. Estas flexibilizações possibilitam menor variação do processo de redução e das propriedades do aço a ser produzido.

Além da granulometria mais grossa do que as partículas de sinter feed (>5mm) a boa redutibilidade e resistência mecânica do produto de sinterização reforçam as vantagens da utilização do sinter como carga metálica do alto-forno para a produção de gusa. Os benefícios trazidos pela aplicação do processo de sinterização levam “a maioria das usinas mundiais operarem com carga de sinter superior a 60%” (GEERDES, M. et al, 2007)<sup>(10)</sup>. Assim a importância e a larga utilização de sinter nos processos de fabricação de aço justifica o foco que será dado neste trabalho ao processo de sinterização.

### *3.5.1 Sinterização do minério de ferro*

#### *Definição*

“A sinterização do ferro é um processo de aglomeração de partículas minerais em uma massa porosa, pela fusão incipiente, causada pelo calor resultante da queima de combustível a ela adicionado” (BALL, D.F et al, 1973)<sup>(6)</sup>. “Este é um processo complexo que envolve diversos fenômenos físico e químico” (CUMMING, M.J. e THURLBY J.A, 1990)<sup>(11)</sup>.

#### *Descrição do processo*

A sinterização do ferro é um processo em contra-corrente de componentes gasosos e sólidos. Ele consiste em misturar finos de minérios de ferro com finos de outros materiais sendo a mistura resultante alimentada em uma grelha permeável. As matérias primas utilizadas na composição da mistura de sinterização são: finos de minério de ferro (sinter feed), combustíveis sólidos, fundentes e resíduos siderúrgicos (FILHO, Alfredo, 1979)<sup>(12)</sup>.

O processo de sinterização se inicia com a mistura em proporções definidas das matérias primas em uma correia transportadora ou em uma pilha de homogeneização, formando o “blend” ou mistura de sinterização. Este “blend” é enviado a um processo

de mistura que por sua vez é dividido em duas etapas: a homogeneização e a granulação.

Na primeira etapa do processo de mistura o “blend” é misturado em um tambor rotativo de forma a se obter uma mistura homogenia das matérias-primas.

Após a homogeneização adiciona-se água à mistura propiciando a formação de grânulos. Estes grânulos por ainda não terem passado pela etapa de queima são denominados grânulos verdes. Após a formação dos grânulos eles são enviados à etapa de sinterização.

A máquina de sinterização possui uma grelha móvel. “No fundo desta grelha existe um sistema de exaustão que succiona ar através do leito de mistura.” (GEERDES, M. et al, 2007)<sup>(10)</sup>. A mistura granulada é então depositada sobre a grelha móvel em camadas de 400 a 900 mm de altura.

A temperatura da superfície superior da mistura da sinterização é elevada pela queima de gás ou óleo em queimadores localizados acima da mistura na grelha. O processo de sinterização começa com a ignição da camada superior da mistura colocada sobre a grelha atingindo temperatura de 1200<sup>0</sup>C/1400<sup>0</sup>C.

O ar quente é então enviado para baixo na direção da grelha. Após um período curto de ignição, calor do topo da mistura de sinterização inicia o movimento descendente ao longo da camada de mistura. As camadas são aquecidas de 1200 a 1500 oC. (BALL, D.F et al, 1973)<sup>(6)</sup>.

Antes da camada da zona de combustão ocorre a evaporação da água e componentes voláteis. Já na zona de combustão ocorre as reações de aglomeração entre as partículas da mistura e aglomerados resistentes são formados (BALL, D.F et al, 1973)<sup>(6)</sup>.

A maioria do calor presente na zona de combustão é absorvido pela secagem, calcinação e aquecimento das camadas inferiores do leito. Quando a zona de combustão atingir o fundo do leito da mistura de sinterização o processo finaliza-se. O produto sinter é então obtido e grosseiramente quebrado. Após o resfriamento o sinter é peneirado. Apenas os produtos com granulometria maior que 5mm são considerados válidos(BALL, D.F et al, 1973)<sup>(6)</sup>.

De acordo com (GONDIM, E. P. et al, 2007)<sup>(13)</sup> a passagem do ar pelo leito provoca o deslocamento da frente de queima ao longo do leito sendo assim definido o perfil de temperatura. Os combustíveis presentes na mistura de sinterização se encarregam de gerar calor necessário para fundir parcialmente a escória e aglomerar as partículas de minério. Durante a combustão o calor gerado promove a vaporização da água, a decomposição dos carbonatos, a fusão das partículas aderentes e amolecimento superficial das partículas nucleantes. O líquido formado pela fusão das partículas aderentes circunda as partículas nucleantes, e durante o resfriamento há a formação de uma matriz que confere resistência mecânica ao sinter.

“No final da esteira, a frente de queima passou por toda a mistura, ou seja, toda a mistura de sinterização sofreu uma semi-fusão redutora, formando o sinter. Posteriormente o produto sinter é descarregado, quebrado, resfriado e peneirado em frações apropriadas. Os finos de sinter (<5 mm) são reutilizados; parte do produto retorna (15-25 mm) para a formação da camada de proteção e o restante é enviado para os silos do alto-forno” (GEERDES, M. et al, 2007)<sup>(10)</sup>.

Grande número de fenômenos físico-químico ocorre durante a sinterização. Dentre eles podemos citar: Troca de calor e massa entre fases gasosas, secagem e condensação de umidade, combustão de combustíveis sólidos como coque, calcinação de carbonatos, reação e solidificação de componentes da mistura de sinterização (VENKATARAMANA, R. et al, 1998)<sup>(14)</sup>.

### ***3.5.2 Sinterização – Granulação***

A preparação da mistura para a sinterização contempla além da pesagem, composição e mistura de seus componentes uma etapa de granulação. Nesta etapa os finos de minério de ferro são aglomerados em um tambor rotativo com adição de água. O objetivo desta etapa é aglomerar as partículas finas nas partículas grossas em um mecanismo de auto assentamento de grânulos (KAPUR, P.C. et al, 1993)<sup>(15)</sup>. Os grânulos apresentam uma distribuição granulométrica mais grossa e homogênea do que a apresentada pela mistura de sinterização (VENKATARAMANA, R. et al, 1998)<sup>(14)</sup>.

A distribuição granulométrica da mistura de sinterização interfere diretamente no mecanismo de formação de grânulos. O crescimento dos grânulos e a espessura da camada de assentamento (leito de sinterização) são determinados inicialmente pela umidade e participação de partículas finas na mistura (KAPUR, P.C, 1995)<sup>(16)</sup>, sendo a relação de crescimento da espessura do leito diretamente proporcional a umidade e a presença de finos (VENKATARAMANA, R. et al, 1999)<sup>(17)</sup>.

LITSTER, J.D. E .WATERS, A.G, 1988<sup>(18)</sup> estudaram os mecanismos de interação entre a água e as partículas dos minérios. Estes estudos indicam que a adição de água favorece a ligação entre as partículas sólidas da mistura constituindo uma ponte de ligação entre as partículas propiciando assim a formação de grânulos. A tensão superficial da água aproxima as partículas sólidas aumentando a resistência dos grânulos.

A granulação da mistura de sinterização é uma etapa chave do processo de sinterização, pois a distribuição granulométrica dos grânulos formados afeta diretamente a permeabilidade do leito de sinterização e conseqüentemente a produtividade e eficiência de queima dos combustíveis impactando na qualidade do sinter. (LITSTER, J.D. E .WATERS, A.G, 1988)<sup>(18)</sup>

A maior permeabilidade do leito facilita o fluxo de gás ao longo de sua extensão melhorando as condições de queima.

Diversos estudos buscam relacionar características da mistura de sinterização com a distribuição granulométrica dos grânulos e a conseqüente produtividade da sinterização.

Mas a mistura de sinterização geralmente é composta por diversos componentes e a caracterização dele é muito complexa e a identificação e avaliação isolada da variação de uma variável isolada da mistura é muito difícil.

A eficiência do processo de granulação é diretamente relacionada tanto aos parâmetros de processo quanto às propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos componentes da mistura de sinterização. Quantidade de material no misturador, o tempo de residência e a velocidade de rotação do tambor são parâmetros de processos a serem controlados para a obtenção de boa eficiência de granulação. Densidade, porosidade, formato e tamanho médio de partículas, distribuição granulométrica das partículas, umidade ótima dentre outras são propriedades da mistura que afetam a granulação.

A mudança de apenas um sinter feed da mistura interfere diretamente em propriedades da mistura como um todo.

A adição de fundentes à mistura de sinterização, em alguns casos pode ser uma solução para incrementar a qualidade de granulação da mistura devido às suas características aglomerantes. Uma prática comum é adição de cal à mistura de sinterização dado o aumento de finos. A maior quantidade de finos na mistura reduz seu índice de granulação reduzindo a permeabilidade do leito e a produtividade do processo de sinterização. A adição cal à mistura aumenta a aglomeração das partículas finas melhorando a granulação da mistura.

### *Umidade*

Umidade é a capacidade dos minérios de armazenar água entre suas partículas. A capacidade máxima de armazenamento de água por unidade de massa dos minérios de ferro é obtida quando há a saturação do minério (XUEWEI, L.V et al, 2010)<sup>(19)</sup>.

A umidade da mistura é o principal fator que determina a eficiência da etapa de granulação. Mas a adição de água à mistura provoca reações favoráveis ou não à granulação.

Cada mistura de sinterização apresenta sua umidade ótima em que a eficiência máxima de granulação é alcançada. Características físicas, químicas das misturas de sinterização determinam a quantidade de água a ser adicionada à mistura de sinterização para se atingir a umidade ótima da mistura e a consequente eficiência máxima de granulação.

Inicialmente com conteúdos de umidade baixos a granulação das misturas é favorecida pela aderência de partículas finas às nucleantes, conforme mecanismos e fenômenos descritos. Sendo então a homogeneidade, a distribuição granulométrica e a esfericidade dos grânulos verdes beneficiadas pela adição de umidade à mistura (VENKATARAMANA, R. et al, 1998)<sup>(14)</sup>. Utilizando dados empíricos de fluxo de gás, (KASAI, E. et al, 1989)<sup>(20)</sup> propôs o cálculo da porosidade a partir da Equação de Ergun. Foi determinado que o aumento da umidade da mistura eleva a sua porosidade, mas esta tendência se inverte com o aumento excessivo de umidade.

Já quando o conteúdo de umidade na mistura atinge níveis elevados há a redução da formação de espaços vazios no leito e o aumento da formação de deformações dos grânulos resultando na redução da porosidade do leito (VENKATARAMANA, R. et al, 1998)<sup>(14)</sup>. Estes prejuízos à permeabilidade da sinterização são agravados com a presença de maior quantidade de material fino na mistura.

Assim atingir a umidade ótima favorece a otimização dos grânulos e conseqüentemente a boa permeabilidade do leito sendo estes parâmetros de vital importância para o bom desempenho da sinterização.

A umidade ótima é impactada tanto por propriedades físicas dos componentes das misturas quanto pelas reações químicas que ocorrem ao se adicionar água na mistura.

Dada a limitação de tempo do processo de granulação os mecanismos cinéticos de absorção de água tornam-se importante para o entendimento de comportamento de diferentes misturas de sinterização durante a etapa de granulação.

Estudos que abordam o mecanismo de interação entre a cinética de formação de grânulos e a umidade presente na mistura de sinterização vêm sendo desenvolvido conforme citado na secção de granulação deste trabalho.

Alguns modelos consideram a abordagem cinética da absorção de água por misturas de sinterização. Estes foram validados através de medições e algumas propriedades dos minérios. Especialmente propriedades das partículas como: tamanho e as características de poros (XUEWEI, L.V et al, 2010)<sup>(19)</sup>.

A partir deste modelo foi possível relacionar as propriedades físicas das misturas de sinterização com a capacidade delas de absorver água levando em consideração uma abordagem cinética. Foi constatado que minérios com maior presença de partículas grandes conseguem absorver mais rápida e facilmente a água do que misturas com maior presença de partículas finas (XUEWEI, L.V et al, 2010)<sup>(19)</sup>.

### *Mecanismo de granulação*

O mecanismo de granulação de sinter feeds difere do previsto para pelletização devido a mais vasta distribuição granulométrica característica deste produto comparado com o pellet feed (LITSTER, J.D. E .WATERS, 1990)<sup>(21)</sup>. Uma melhor compreensão dos mecanismos de granulação é necessária para se relacionar a capacidade de granulação de uma mistura de sinterização com as propriedades dos componentes nela presentes.

O principal mecanismo do processo de granulação é dado pela aderência de partículas finas em partículas maiores (LITSTER, J.D. E .WATERS, A.G, 1988)<sup>(18)</sup>. As forças de ligação são principalmente forças capilares, devido à presença de água na camada de finos. A adição de água durante a granulação é essencial, pois induz a adesão do material fino às partículas nucleantes (LITSTER, J.D. E .WATERS, 1990)<sup>(21)</sup>.

LITSTER, J.D. E .WATERS, 1986<sup>(22)</sup> mostraram que partículas de tamanho intermediário agem como núcleos ou aderentes. Dentre elas as maiores constituem um núcleo capaz de atrair e aderir as partículas menores. As primeiras são denominadas nucleantes e as outras partículas denominadas aderentes. A fração de partículas que agem como nucleante ou semente é definida por um coeficiente de partição obtido a partir da distribuição granulométrica da mistura. Estudos microscópicos mostram claramente os núcleos envoltos por finos (FURUI. T. et al, 1977)<sup>(23)</sup> (HIDA. Y et al 1992)<sup>(24)</sup>. A figura 3.5 mostra microscopicamente a formação de núcleos aglomerantes. O mecanismo de formação dos grânulos ocorre em dois estágios (ROLLER P.W, 1982)<sup>(25)</sup>.

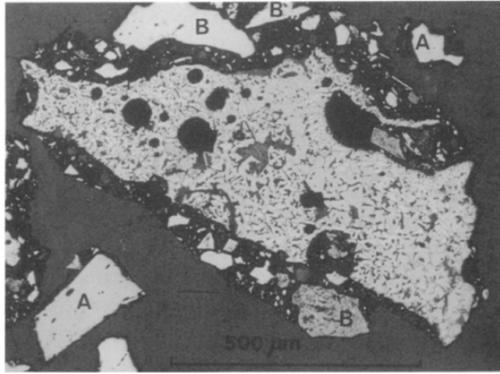


Figura 3.5: Fotos microscópicas da formação de núcleos aglomerantes (LITSTER, J.D. E .WATERS, A.G, 1988)<sup>(19)</sup>.

Inicialmente há a formação de uma camada interna pela aderência de partículas muito finas às partículas nucleantes.

Em seguida há a formação da camada externa. Esta é constituída por partículas denominadas intermediárias cuja granulometria encontra-se entre as partículas finas e nucleantes. (LITSTER, J.D. E .WATERS, A.G, 1988)<sup>(19)</sup>.

A partir de então, quando uma partícula intermediária entra em contato com um grânulo maior, pode haver uma ligação entre esta partícula e as partículas finas do grânulo havendo então incorporação da partícula ao grânulo. O mecanismo de granulação é mostrado esquematicamente na fig. 3.6.

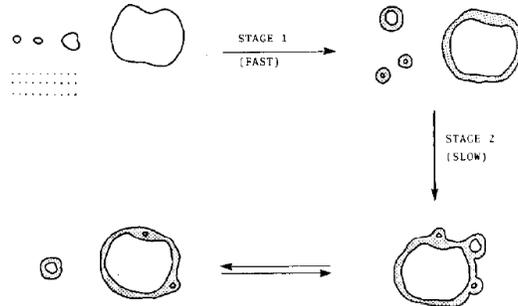


Figura 3.6: Desenho esquemático do mecanismo de granulação (LITSTER, J.D. E .WATERS, A.G, 1988)<sup>(19)</sup>.

Outra teoria a cerca do mecanismo de granulação foi proposto por (NAGANO, S. et AL, 1985)<sup>(26)</sup>. Esta teoria assume a estrutura dos grânulos contempla três camadas. Nesta teoria as partículas mais grossas agem também como nucleantes ou sementes dos grânulos. A camada intermediária ocorre devido a aderência das partículas finas. A ligação entre essas partículas e a camada inferior do grânulo é bastante forte. A camada externa também é formada pela aderência de partículas finas, mas nestas camadas a ligação com as camadas inferiores é mais frágil (VENKATARAMANA, R. et al, 1998)<sup>(14)</sup>.

### *Cinética da granulação*

A cinética de granulação de misturas de sinterização de minério de ferro impacta diretamente na distribuição granulométrica dos grânulos. Vários estudos sobre o efeito de propriedades de alimentação em granulação têm negligenciado a interferência da cinética de granulação (LITSTER, J.D. E .WATERS, 1990)<sup>(21)</sup>.

Estes trabalhos consideram que independente do tempo de duração do processo de granulação sempre se atingiu o tamanho de grânulo máximo e estável.

Estudos experimentais de granulação em escala piloto mostraram que o tempo de granulação apresenta efeito significativo sobre a produtividade de sinterização pote.

Em simulações físicas realizadas em pequena escala é possível mostrar que o crescimento do grão é contínuo até que seja atingida uma distribuição granulométrica estável (LITSTER, J.D. E .WATERS, A.G, 1988)<sup>(19)</sup>.

O tempo de residência necessário para a granulação estável de uma mistura pode ser prevista a partir de simulações físicas em pequena escala.

Trabalhos que consideram ensaios físicos em pequena escala registraram crescimento grânulo assumindo um mecanismo de coalescência com crescimento contínuo de pelo menos 10 min (MIZUKAMI, S. et al, 1986)<sup>(27)</sup>.

Outros registram em ensaios de laboratório crescimento dos grânulos após 12 minutos (NAGANO, S. et AL, 1985)<sup>(26)</sup>.

Os períodos gastos para a granulação registrados nos trabalhos de (MIZUKAMI, S. et al, 1986)<sup>(27)</sup> e de (NAGANO, S. et AL, 1985)<sup>(26)</sup> são bem superiores ao geralmente tempo reservado à granulação.

### ***3.5.3 Sinterização – Fenômeno Físico e Químico***

De acordo com CASTRO, L.F.A et AL, 1985<sup>(28)</sup>.o mecanismo de sinterização é determinado por dois fenômenos distintos: Fenômeno físico de transferência de calor e o fenômeno químico de combustão do carbono. Estes fenômenos são interdependentes, e definem as zonas de sinterização e o desenvolvimento do processo. O equilíbrio entre os dois fenômenos determina a qualidade da queima, o desempenho do processo de sinterização, o consumo de combustível e a qualidade do produto.

“O fenômeno químico consiste na queima do combustível presente na mistura de sinterização que produzindo calor, gera uma frente de reações químicas. A evolução da frente está diretamente relacionada à quantidade e a reatividade dos combustíveis sólidos, da umidade, composição química da mistura além de algumas características químicas e mineralógicas dos minérios da mistura”<sup>(2)</sup>

“Já o fenômeno físico consiste na transferência de calor da camada superior para a inferior proporcionada pela sucção forçada de ar formando uma frente térmica. A velocidade de propagação da frente térmica é proporcional à vazão de ar, a altura da

camada, umidade e distribuição granulométrica da mistura, intensidade da ignição dentre outros fatores”<sup>(2)</sup>.

### 3.5.4 Sinterização – Equacionamento químico

O processo de sinterização pode ser dividido em zonas: úmida, de secagem, de reação e de resfriamento. A figura 3.7 ilustra as zonas do processo de sinterização.

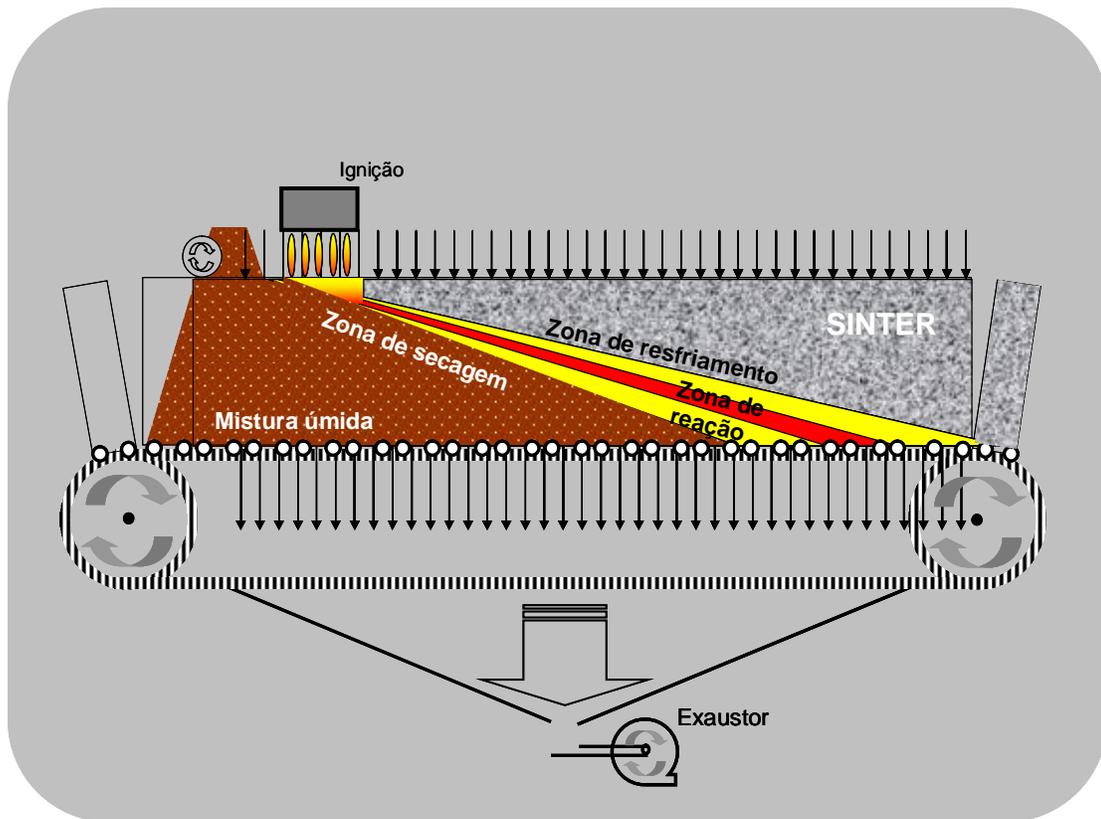
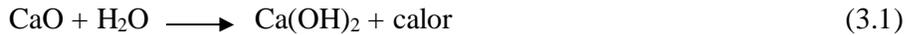


Figura 3.7: Desenho esquemático das zonas do processo de sinterização

- Zona úmida: constitui a base do leito de mistura a sinterizar. Nesta zona os materiais encontram-se conforme saíram da etapa de granulação. A temperatura máxima atingida é de 100° C. As principais reações que ocorrem nesta etapa são a hidratação da cal e a condensação dos vapores de água. As equações (3.1) e (3.2) representam as reações mencionadas.

✓ Hidratação da cal



✓ Condensação dos vapores de água



➤ Zona de secagem: Nesta região ocorre a vaporização da umidade da mistura e a desidratação dos hidróxidos. As temperaturas variam de 100<sup>0</sup>C a 500<sup>0</sup>C. As principais reações que ocorrem nesta etapa são a desidratação do hidróxido de cálcio e a vaporização da umidade. As equações (4.3) e (4.4) representam as reações mencionadas.

✓ Desidratação do hidróxido de cálcio

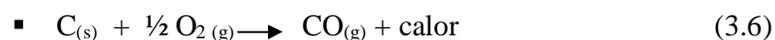
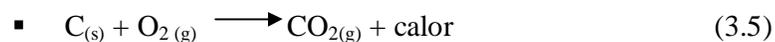


✓ Vaporização da umidade

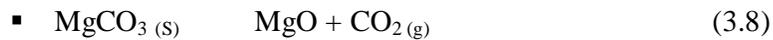
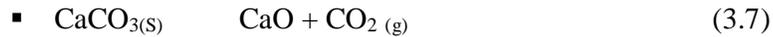


➤ Zona de reação: Esta região compreende toda a região térmica de aquecimento acima de 500<sup>0</sup>C. Nestas temperaturas há a ignição do carbono até o início do resfriamento do sinter, ocorrendo reações simultaneamente reações químicas e aglomerantes. Dentre elas: combustão do carbono, decomposição dos carbonatos, reações na fase sólida, redução e re-oxidação dos óxidos de ferro e reações de formação da escória.

✓ Reação de combustão do combustível carbonoso que leva a formação de CO e CO<sub>2</sub>. Ocorre a elevação de temperatura de 500<sup>0</sup>C até 1400<sup>0</sup>C. As equações (4.5) e (4.6) representam as reações mencionadas.



- ✓ Reação de decomposição dos carbonatos:



- ✓ Reações na fase sólida: Uma boa homogeneização da mistura de sinterização é muito importante para o contato entre partículas de minério. O contato de CaO e SiO<sub>2</sub>, é um fator determinante para a ocorrência das reações sólido-sólido. Durante o aquecimento da mistura na máquina de sinterização, o contato entre as partículas de CaO e SiO<sub>2</sub>, favorece a formação de cálcio-ferritas, fayalitas e silicatos.
- ✓ Reações de redução e re-oxidação: ocorrem desde a zona superior de aquecimento até o início do resfriamento.
- ✓ Reações de formação de escória: que ocorrem na frente de combustão. Os componentes da carga, após as reações na fase sólida, entram em estado de semi-fusão e em seguida se recristalizam. Os silicatos (2 CaO. SiO<sub>2</sub> e 3CaO. SiO<sub>2</sub>) são os principais produtos destas reações.
- ✓ Reações de aglomeração. Estas reações ocorrem em etapas a temperaturas maiores que as temperaturas de fusão dos materiais (reações entre sólido-líquido e reações líquido-líquido).
  - Inicialmente, em temperaturas próximas de 1100<sup>0</sup>C ocorre uma reação sólido-sólido da hematita com CaO levando a formação de cálcio-ferritas.
  - A 1200<sup>0</sup>C inicia-se a formação da fase líquida da cálcio-ferritas. Em forma líquida a cálcio-ferrita rica em CaO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> começa a incorporar alguns óxidos presentes no minérios como SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e MgO. A fase líquida leva a desintegração superficial da hematita e a conseqüente formação da hematita granular.

- Após a incorporação de MgO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ocorre a reação entre a fase líquida e hematitas. Estas reações levam a formação de cálcio-ferritas sólidas aciculares ricas em Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub>.
- Se temperaturas acima de 1300<sup>0</sup>C não forem atingidas ou se tempo de residência nesta faixa de temperatura for muito pequeno haverá, após o resfriamento, a formação de um produto heterogêneo. Este produto é assim classificado por ser rico micro estruturalmente em cálcio-ferritas arredondadas imersas em uma matriz e de silicatos cristalizados e hematitas granulares.
- Se temperaturas superiores a 1300<sup>0</sup>C forem atingidas haverá a formação de um produto homogêneo. Atingindo este nível térmico, a tendência da cálcio-ferrita é se aglomerar com partículas grossas de minério fundido formando hematita ou magnetita e escoria vítrea. Durante o resfriamento precipitados de hematita da fase líquida e cálcio-ferritas cristalizam na forma de flocos longos denominados forma colunar. Características típicas do sinter homogêneo.

### 3.6 Matérias-primas

As principais matérias-primas que constituem a mistura de sinterização são: Minérios de ferro, fundentes, adições e combustíveis.

Minérios que apresentam a distribuição granulométrica abaixo são classificados como Sinter feed:

- Cerca de 0% de fração >10 mm
- De 45 a 60% de fração 1 a 10mm
- Menos de 15% de fração <200 mesh

A matriz de sinter feeds geralmente é composta por um conjunto de minérios cujas propriedades são bastante diferentes. Grandes variações químicas, físicas, metalúrgicas

e mineralógicas ocorrem dentre os diversos sinter feeds ofertados no mercado siderúrgico. Além da distribuição granulométrica as principais propriedades físicas que caracterizam os sinter feed são: o poder de aglomeração a frio, sua porosidade e densidade além do índice de crepitação.

O desempenho do processo de sinterização é fortemente influenciado pelas propriedades dos sinter feeds que compõem a mistura de minérios. Diferentes tipos de sinter feeds apresentam diferentes sinterabilidades/reatividade impactando variáveis operacionais da sinterização importantes como: produtividade, consumo de combustível, comportamento metalúrgico e resistência mecânica do produto.

De acordo com COSTA. E et al, 1995 <sup>(29)</sup> os principais fatores que determinam a performance da sinterização são atribuídos a qualidade dos componentes da mistura de sinterização e conseqüentemente da qualidade final da mistura. Abaixo são citados algumas destas variáveis:

- % ferro total;
- % alumina ;
- Umidade;
- % de combustível;
- Basicidade
- Distribuição granulométrica
- Participação de hematita na composição;

Devido tanto a fatores de oferta de minério no mercado quanto devido às diferentes características física e química dentre os minérios, as sinterizações industriais adotam como prática a composição de matrizes de sinterização com vários sinter feeds. Esta prática é bastante favorável ao processo, pois muitas vezes diferentes sinter feeds apresentam composições complementares e benéficas ao processo. A figura 3.8 mostra fotos de amostras de minérios de ferros comercializados no mundo.



Figura 3.8: Minérios de ferro ofertados para o mercado

De acordo com CAPORALLI, L et al, 2002 <sup>(30)</sup> “a dificuldade do processo de sinterização e da obtenção da qualidade otimizada do sinter ocorre em grande parte devido a complexidade das reações, a velocidade que elas ocorrem e ao fato destas reações serem dependentes da química, da mineralogia, da granulometria e porosidade dos minérios e fundentes”. O mesmo conceito é reforçado por (LI HONG-GE et al, 2011)<sup>(31)</sup>. De acordo com este autor a qualidade e o rendimento do sinter é principalmente determinado pelas propriedades dos minérios que compõe a mistura de sinterização, especialmente quando consideramos as propriedades a altas temperaturas.

A grande diversidade dos minérios dita a complexidade das reações dificultando o entendimento do processo. Ainda considerando CAPORALLI, L et al, 2002 <sup>(30)</sup> “o grau e complexidade das reações de sinterização aumenta com o aumento do numero de minérios da mistura de sinterização”.

Além da matriz de sinter feeds os demais componentes da sinterização também interferem diretamente no desempenho do processo de sinterização.

Os fundentes juntamente com as impurezas presentes na matriz de sinter feed e no combustível são responsáveis pela a formação de escória do processo que por sua vez é essencial para a coesão das partículas. Além da formação de escória a adição de fundentes é importante no ajuste de qualidade do sinter e no controle da cadeia de produção de aço.

A cal é um importante fundente largamente utilizado nas sinterizações. Este fundente além de ser essencial para a operação do alto-forno, pois aumenta a capacidade de aglomeração das partículas, permitindo a manutenção da boa permeabilidade do leito de sinterização e conseqüentemente de uma boa produtividade do processo. A adição deste fundentes é uma prática comum no mercado chinês cuja presença de minérios com grande percentagem de partículas finas é grande.

Outros tipos de fundentes adicionados à sinterização são os fundentes a base de MgO e a base de sílica.

Os fundentes a base de sílica são adicionados na sinterização geralmente com a função de corrigir a participação de sílica na mistura de acordo com a qualidade visada do sinter.

Há grande diferença entre a utilização de fundentes a base de CaO e fundentes a base de MgO. Ambos são adicionados como carbonatos (calcário –  $\text{CaCO}_3$  ou dolomita –  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) e consomem energia, pois sofrem decomposição na máquina de sinter. Contudo as fusões contendo cal ocorrem em temperaturas mais baixas do que as realizadas na presença de MgO. Já que a presença de MgO leva a formação de uma estrutura mais estável denominada espnélio ( $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  com FeO).

Consideram adições os elementos ou compostos inexistentes na carga ou mesmo resíduos de todas as unidades da usina adicionados à mistura de sinterização. Assim como os fundentes as adições são introduzidas no processo para o controle e ajuste químico da qualidade do produto de sinterização.

Diversos trabalhos buscam quantificar e justificar os impactando em variáveis operacionais da sinterização e na qualidade do sinter formado. Alguns deles abordam as diferenças nas reações devido a variações nas propriedades de minérios ou devido à propriedades dos fundentes considerados, outros já detalham fenômenos presentes no processo como a assimilação de escória e formação do sinter.

LI HONG-GE et al, 2011<sup>(31)</sup> propõe curvas de fusão de minério de ferro ao longo da sinterização e através das quais as propriedades de fusão são definidas e justificadas em função de propriedades de diferentes sinter feeds e em função da variação de propriedades de fundentes.

A avaliação do impacto no processo devido à variação em propriedades de sinter feeds considerou um minério hematítico brasileiro e um minério limonítico australiano. Já os impactos devido à variações em propriedades de fundentes considerou diferentes basicidade para a mistura e variações na granulometria da cal. A variação da basicidade da mistura visou quantificar o impacto do aumento da adição de fundente na mistura (CaO).

As tendências obtidas nas curvas resultantes do trabalho confirmam a interferência no processo de sinterização da variação tanto de propriedades dos minérios e fundentes quanto da presença de fundentes na mistura.

As curvas para diferentes composições de misturas dos minérios e diferentes basicidades apresentam três estágios definidos.

A figura 3.9 mostra os diferentes estágios de fusão observados e que descrevem o fenômeno.

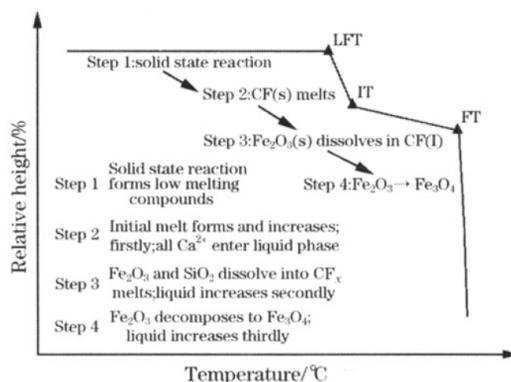


Figura 3.9: Estimativa dos fenômenos de fusão dos sinter feed no processo de sinterização (LI HONG-GE et al, 2011) <sup>(31)</sup>.

Os pontos de inflexão são denominados temperatura de formação de líquido, temperatura de inflexão e temperatura fluida. Durante o primeiro estágio sugere-se a ocorrência de uma contração rápida, no segundo a velocidade de contração diminui e o terceiro há a fusão. Diferentes curvas foram obtidas para cada um dos minérios avaliados. Observaram-se diferenças nos comportamentos das curvas confirmam a interferência das propriedades dos minérios no processo. A figura 3.10 mostra o perfil

de temperatura em função da altura do leito do processo de sinterização de diferentes tipos de misturas de sinterização avaliadas.

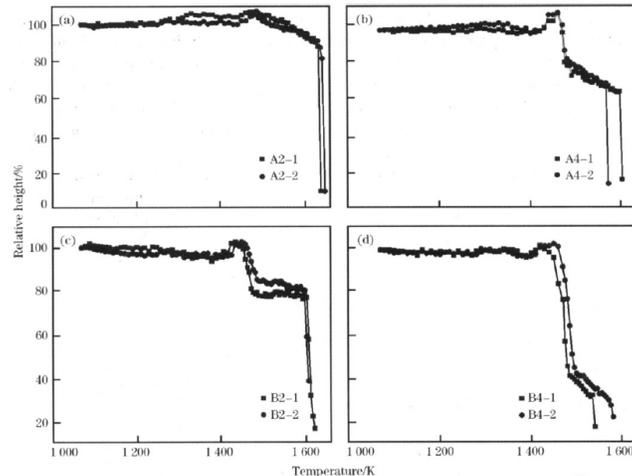


Figura 3.10: Perfil de temperatura em função da altura do leito do processo de sinterização de diferentes tipos de misturas de sinterização avaliadas (LI HONG-GE et al, 2011) <sup>(31)</sup>.

Os impactos nas propriedades de fusão devido à participação de fundentes na mistura de sinterização ocorrem devido a dois fatores.

Termodinamicamente, analisando o diagrama ternário  $\text{CaO-Fe}_2\text{O}_3$  a adição de  $\text{CaO}$  na mistura reduz a temperatura de fusão. Já Considerando a cinética das reações a presença de  $\text{CaO}$  interfere diretamente na viscosidade. As misturas de menor basicidade apresentam viscosidade 10 vezes maior do que as misturas com maior adição de  $\text{CaO}$  (LI HONG-GE et al, 2011) <sup>(31)</sup>.

O trabalho de KASAI E. e SAITO F., 1996<sup>(32)</sup> aborda conceitos de incorporação de materiais fluxantes na sinterização avaliando os fenômenos térmicos de assimilação e formação de escória em misturas compostas por diferentes tipos de minérios quanto em misturas compostas por fluxantes com propriedades distintas. O trabalho contempla misturas com participações de minérios pisolíticos e minérios hematíticos e o calcário foi o material fluxante avaliado. A partir da aplicação de um método de análise DTA

(análise de diferença térmica) foi possível construir curvas que indicam mudanças térmicas dadas às variações de minérios ou de propriedades dos fundentes e/ou minérios presentes nas misturas.

As análises das curvas de DTA obtida para cada uma das misturas fornecem informações qualitativas que auxiliam na definição da composição de uma mistura de sinterização.

Os resultados do trabalho confirmam os seguintes comportamentos:

- adição de CaO favorece a fusão da mistura diminuindo a temperatura e o calor necessário para o início da sinterização;
- o aumento da concentração de componentes de  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$  desfavorecem o processo;
- a variação granulométrica dos fundentes também interfere na sinterização dada a interferência na reatividade e a formação de poros.

CAO Yong-guo et al, 2011<sup>(33)</sup> e CLOUT, J.M.F et al, 2003<sup>(34)</sup> também abordam impactos no processo de sinterização e na qualidade do produto formado devido a variações na mistura de sinterização.

CAO Yong-guo et al, 2011<sup>(33)</sup> vislumbrando a redução de oferta de minérios de alta qualidade (elevado teor de ferro e baixo teor de impurezas) estuda o impacto na sinterização dada a variação de propriedades macro e microscópica entre estes minérios e minérios de baixa qualidade. O trabalho também contempla considerações sobre propriedade a altas temperaturas.

O trabalho confirma experimentalmente a sensibilidade do processo de sinterização a variações químicas dos minérios.

CLOUT, J.M.F et al, 2003<sup>(34)</sup> vislumbrando a composição na china de misturas de sinterização tanto por minérios hematíticos quanto por magnetíticos propõe um estudo de investigação dos impactos na sinterização e na qualidade do sinter produzidos a partir destas misturas.

Os conhecimentos a cerca da sinterização de minérios magnetíticos são bem reduzidos quando se compara com a sinterização de minérios hematíticos. Para a comparação foram realizadas simulações físicas de misturas compostas por minérios magnetíticos, misturas de minérios hematíticos e misturas compostas por participações de ambos. Diferenças no comportamento ao longo da sinterização, na mineralogia, nos mecanismos de ligação entre os minérios magnetíticos e hematíticos foram monitorados.

Experimentalmente observou-se que mistura de minérios hematíticos e magnetíticos comportam como minérios concentrados magnetíticos (CLOUT, J.M.F et al, 2003)<sup>(34)</sup>.

As simulações mostraram que sinter com adequada resistência só pode ser obtido a partir de minérios magnetíticos se a sinterização ocorre a elevadas temperaturas (1350-1370°C), uma vez que altas temperaturas são necessárias para a formação das ligações magnetita-magnetita.havendo conseqüentemente elevação no consumo de combustível nos processos que contemplam a participação destes minérios (CLOUT, J.M.F et al, 2003)<sup>(34)</sup>.

Já a avaliação feita para os minérios hematíticos a formação do sinter ocorreu a baixas temperaturas (<1300 °C) e o sinter produzido mostrou-se bastante resistente dada as ligações entre as calci-ferritas formadas (CLOUT, J.M.F et al, 2003)<sup>(34)</sup>.

HINKLEY, J. et al,1994 <sup>(35)</sup> aborda o impacta que variações na matriz de minério da mistura de sinterização na formação do leito e conseqüentemente na permeabilidade.

O estudo considera dez misturas compostas a partir de sete distintos sinter feeds. Resultando em composições com propriedades como distribuição granulométrica e conteúdo de umidade distinto.

O trabalho desenvolve uma técnica que quantifica a porosidade do leito função das propriedades da mistura de sinterização A quantificação de espaços vazios nos experimentos realizados no trabalho foi feita em função do conteúdo de umidade das misturas. Os resultados de todos os ensaios indicam a mesma tendência. Quanto maior o conteúdo de umidade da mistura maior a porosidade do leito. E a formação de espaços vazios entre as partículas que constituem o leito é diretamente relacionada com a quantidade de partículas aderentes ao redor das nucleantes, ou seja, com a distribuição granulométrica e umidade ótima da mistura.

### 3.6.1 Sinterização – Parâmetros de processo

O processo de sinterização é bastante complexo e sua eficiência é impactada por diversos parâmetros operacionais. Simultaneamente a interação e interferência entre os próprios parâmetros também provoca variações no processo (WON YANG et al, 2003)<sup>(36)</sup>.

Os parâmetros de processo que melhor representam o desempenho da sinterização são:

- Propriedades de mistura de sinterização
- Produtividade
- Velocidade de Sinterização
- Rendimento da Mistura Parcial
- Rendimento do Bolo
- Consumo Específico do Carbono Fixo,
- Temperatura na zona de combustão
- Altura do leito de sinterização
- Tempo de sinterização e velocidade de chama
- Grau de sinterização
- Pressão de sucção
- Deslocamento da frente de queima.
- Temperatura do leito

NOGUEIRA, R. et al, 2003<sup>(37)</sup> aborda relações de alguns desses parâmetros com a mudança de volume de escória do sinter.

- o rendimento do bolo possui forte correlação com os volumes de escória o que deixa claro a dependência entre rendimento e a matriz de escória do sinter. A

queda de rendimento é evidenciada pelo aumento da geração de finos retorno (NOGUEIRA, R. et al, 2003)<sup>(37)</sup>.

- A queda de produtividade está associada à menor velocidade de sinterização, rendimento e densidade a granel (NOGUEIRA, R. et al, 2003)<sup>(37)</sup>.
- O consumo de carbono fixo também foi influenciado fortemente pelo volume de escória. A elevação do consumo específico de carbono fixo está associada à queda do rendimento, causada pelo aumento da geração de sínter retorno (NOGUEIRA, R. et al, 2003)<sup>(37)</sup>.

Muitos trabalhos da literatura buscam o entendimento do processo de sinterização. Há tanto trabalhos com foco fenomenológico quanto trabalhos mais práticos em que o monitoramento e controle de parâmetros de processo de uma planta de sinterização são prioridade.

Para análise dos fenômenos inerentes ao processo a maioria dos trabalhos lança mão de modelos matemáticos. (DONSKOI, E. et al)<sup>(38)</sup>.

Modelos matemáticos e simulações físicas são capazes de reproduzir o processo de sinterização. São ferramentas importantes para entender os fenômenos e mecanismos do processo e prever o comportamento do leito (DONSKOI, E. et al)<sup>(38)</sup>. Com os modelos é possível ainda avaliar impactos devido a variações de misturas e/ou parâmetros da sinterização a custos bastante reduzidos e sem a interferência na produção industrial.

Os modelos matemáticos são geralmente validados e calibrados pela comparação dos dados obtidos em sinterizações reais ou em simulações físicas que simulam o processo. Assim, de uma forma geral a maioria dos trabalhos analisados apresenta, juntamente com o modelo proposto, dados obtidos em simulações físicas do processo.

Usualmente existem modelos matemáticos que descrevem fenômenos e mecanismos que podem ocorrer no processo de aglomeração (DONSKOI, E. et al)<sup>(38)</sup>.

- transferência de calor e massa,
- secagem e condensação de água
- movimentação de fluxo de gás

- combustão de coque
- fusão
- condensação

Alguns modelos ainda incluem modelagem de fenômenos como retração do leito, variação de tamanhos dos grânulos e porosidade (DONSKOI, E.et al)<sup>(38)</sup>.

MITTERLERHNER, J et al, 2004<sup>(9)</sup> propõe um modelo do processo de sinterização focado nas características térmicas do processo visando a representação da velocidade de propagação da frente que queima.

O modelo em questão foi desenvolvido a partir de uma célula unidimensional do leito. O modelo considerado mostrou-se capaz de simular:

- O comportamento do gás no interior do leito, inclusive considerando a recirculação do gás
- Segregação das partículas no leito
- Transferência de calor devido a condução e convecção
- Vaporização e condensação da água inclusive considerando poros na camada
- Decomposição térmica dos carbonatos no leito
- Combustão do coque
- Semi-fusão e solidificação do material sólido
- Retração do leito

A validação do modelo foi feita a partir da comparação com resultados obtidos em simulações físicas de pequena escala, sinter pot.

Considerou-se a composição do gás de saída do leito em termos tanto do teor de monóxido de carbono quanto do teor de dióxido de carbono obtida na simulação numérica e na simulação física. Foi avaliado o comportamento do fluxo de massa de gás durante o processo a frente de vaporização ao longo do leito, o tempo de deslocamento da frente de queima e o perfil de temperatura do leito completam.

Todos os parâmetros monitorados apresentaram boa aproximação dos resultados obtidos durante as simulações física e numérica.

Para um melhor entendimento do modelo avaliou-se a reação deste perante variações de parâmetros de processo. Os parâmetros considerados foram:

- Diâmetro dos materiais sólido;
- Composição do material sólido;
- Condições operacionais;
- Entalpias de fusão;
- Fração de vazios no leito;

A aplicação do modelo sugere maior sensibilidade do processo dada uma variação de diâmetro das partículas, seguida por variações na porosidade do leito e por mudanças na participação de combustível presente na mistura. A figura 3.11 quantifica a sensibilidade do modelo e do processo quanto aos parâmetros avaliados.

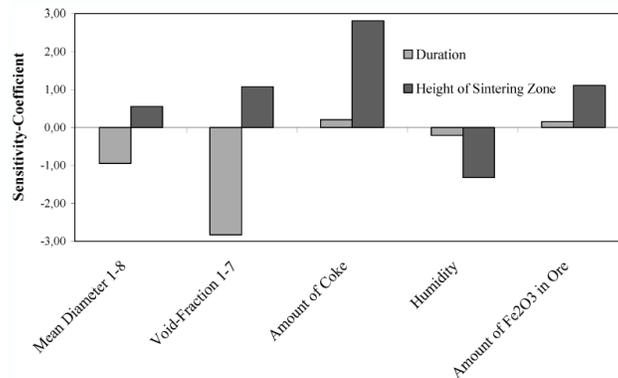


Figura 3.11: O gráfico mostrado quantifica a sensibilidade do modelo e do processo quanto aos parâmetros avaliados (MITTERLERHNER, J et al, 2004<sup>(9)</sup>)

YOUNG, R.W, 1997<sup>(39)</sup> desenvolveu um modelo matemático dinâmico do processo de sinterização baseado em estudos sobre fatores que afetam o leito de máquinas de sinterização com layout semelhante ao projetado por Dwight-Lloyd.

Este modelo foi baseado em balanço de massa e energia para as fases sólida e gasosa e fornece os perfis de temperatura das duas fases ao longo do leito. As concentrações de oxigênio, óxidos de carbono, água, calcário e combustível em função do tempo de sinterização ao longo do leito também são consideradas. O modelo não considera interações entre os parâmetros avaliados.

O modelo mostrou sensibilidade perante a variação de parâmetros de processos. Os efeitos decorrentes da variação dos principais parâmetros de processo e condições limites do modelo foram demonstrados. O modelo permite o estudo do comportamento dinâmico do leito dada variações no fluxo de gás ou propriedades da mistura.

Por exemplo, citamos a aplicação do modelo na determinação de variações da temperatura ao longo do leito. O aumento brusco de temperatura seguido de queda demonstra a passagem da frente de queima em um ponto específico do leito. Outra sensibilidade comprovada deste modelo seria a avaliação de impactos dado um aumento de coque ou dada uma redução do tempo de sinterização (YOUNG, R.W, 1997)<sup>(39)</sup>.

Mas o modelo apresenta algumas falhas como, por exemplo, a atenuação de sua sensibilidade da redução do tempo de sinterização na aplicação de elevados valores de sucção.

CUMMING, M.J. e THURLBY J.A, 1990<sup>(11)</sup> também propõe um modelo que prever condições de uma sinterização Dwight-Lloyd. Considerando também os parâmetros operacionais do processo semelhante ao do trabalho de YOUNG, R.W, 1997<sup>(39)</sup> este modelo introduz um fator de retração da mistura de sinterização.

Já SHIBATA, J, 1988<sup>(40)</sup> propõe um modelo matemático do processo que aborda fenômenos de combustão de coque, secagem de sólido, decomposição de calcário, fusão e solidificação do minério de ferro além da concentração e composição do gás. Sendo os principais parâmetros monitorados a temperatura ao longo do leito, o tempo de sinterização, as propriedades físicas das partículas sólidas presente na mistura de sinterização e a velocidade de propagação ou deslocamento da chama.

Os resultados mostram que também este modelo é sensível a efeitos de variações dos parâmetros de processo sendo possível sua aplicação para avaliação de novas misturas ou estudo de efeitos de variações de parâmetros de processo. Dentre eles citamos: a participação de coque e fundentes na mistura de sinterização, umidade e condições de

ignição variações na temperatura, no volume e pressão de ar ao longo do leito também mostram boa aproximação com resultados operacionais.

Em um trabalho adicional SHIBATA, J. et al, 1999<sup>(41)</sup> descrevem um modelo matemático que prevê o comportamento da sinterização a partir de análises quantitativas dos fenômenos que ocorrem nas camadas internas do leito. As influências do volume de ar e queda de pressão no leito de sinterização são ressaltadas neste trabalho.

Este modelo também considera troca de calor entre a fase sólida e gasosa, reações de combustão do coque, processos de fusão e amolecimento de minérios de ferro além da vaporização da mistura e recondensação do vapor. Em paralelo ao modelo este trabalho contempla simulações físicas de sinterização que foram utilizadas para avaliar variações de pressão no leito.

As variações na pressão de cada uma das zonas do leito foram observadas experimentalmente pela simulação física e analisadas teoricamente.

O enfoque deste trabalho é de suma importância devido a tendência de aumento de produtividade a partir da elevação da altura do leito de sinterização e da interferência da taxa de transferência de calor e da combustão do coque pelo volume de ar passando pelo leito interfere (SHIBATA, J. et al, 1999)<sup>(41)</sup>.

Neste trabalho também variações no perfil de temperatura e nas taxas de reação foram bem representadas pelo modelo matemático. Mas o modelo proposto neste trabalho indica condições limites para a umidade presente no ar de sucção. Uma maior quantidade de umidade reduz a taxa de combustão do coque.

Os trabalhos VENKATARAMANA, R. et al, 1998<sup>(14)</sup> e GIRI B.K. e ROY G.G, 2012<sup>(42)</sup>, assim como diversos outros trabalhos inclusive aqui citados propõem modelos matemáticos do processo de sinterização para a determinação dos perfis de temperatura do leito. Mantendo o mesmo objetivo, POSADO RODRIGUEZ M.J. et al, 2009<sup>(43)</sup> e PANYCHEV A.A e NIKONOVA A.P, 2008<sup>(44)</sup> apresentam modelos cujo foco de aplicação é bastante prático. Esses modelos são focados na otimização operacional de plantas de sinterização visando não apenas o entendimento dos fenômenos do processo e a relação dependência de parâmetros como também a obtenção de maior estabilidade do processo de sinterização através de sistemas de controle.

POSADO RODRIGUEZ M.J. et al, 2009<sup>(43)</sup> apresenta a abordagem prática do controle do processo térmico da sinterização pelo monitoramento da temperatura máxima do gás nas caixa de vento.

Neste trabalho é desenvolvido um modelo matemático de balanço de massa e de balanço térmico baseado em equações diferenciais capaz de determinar o perfil de temperatura do ar presente na caixa de vento baseado na desempenho das duas plantas de sinterização presente na siderúrgica da ArcelorMittal em Asturias. As respostas do modelo foram validadas pela comparação a dados operacionais destas duas plantas coletados por 12 meses. Os principais dados considerados no modelo foram: consumo de materiais sólidos, condições operacionais como velocidade da grelha, fluxo de gás ao longo do leito, condições de ignição e perfis de temperatura da caixa de vento. A partir da comparação dos resultados o modelo se mostrou robusto.

Após o desenvolvimento do modelo e validação dos resultados obtidos foi desenvolvido um sistema de controle para automação de ajuste operacional das máquinas de sinterização. A aplicação destes controles favorece a otimização do processo de sinterização, uma vez que torna possível não apenas reduzir o consumo de combustível, mas também para aumentar a produtividade e qualidade de sinterização.

PANYCHEV A.A e NIKONOVA A.P, 2008<sup>(44)</sup> inter-relaciona parâmetros do processo de sinterização abordando relações matemáticas entre parâmetros e prática operacionais da planta Ural Steel. Citamos como exemplo a inter-relação abordada entre a pressão e o deslocamento da frente de queima. Se a pressão de sucção é muito pequena ocorre com a redução de velocidade do deslocamento da frente de queima, havendo redução na taxa de transferência de calor nas camadas inferiores do leito. Já se a pressão for muito grande a transferência de calor ocorre muito rapidamente impactando nas reações de formação do sinter e conseqüentemente em suas qualidades físicas.

Como resultado do estudo um programa computacional é proposto para automatizar e controlar este processo operacional. A otimização do processo é feita pela variação dos seguintes parâmetros operacionais: controle do vácuo criado pelo exaustor, altura do leito, mudanças da composição da mistura além do controle da velocidade da grelha móvel que determina o tempo de sinterização.

Há ainda desenvolvimento de trabalhos voltados diretamente para a melhoria na obtenção de dados operacionais das plantas de sinterização. Estes trabalhos buscam desenvolver métodos e aparato capazes de fornecer dados confiáveis mesmo considerando grandes interferências físicas e condições adversas possíveis de ocorrer ao longo da sinterização como fusão de fluxantes e elevadas temperaturas. O trabalho de

### **3.6.2 Sinterização – Combustão**

O suprimento de energia necessário ao desenvolvimento das reações do processo de sinterização ocorre na maioria das sinterizações devido à adição de finos de coque na mistura de sinterização. Este componente representa 4% em massa dos materiais sólidos da mistura de sinterização. As propriedades de combustão do combustível interferem diretamente na qualidade do produto de sinterização obtido. Assim a larga utilização do coque ocorre devido às suas propriedades mecânicas, estrutural e de combustão (reatividade) (WON YANG et al, 2006) <sup>(45)</sup>. Alternativa de combustível para a sinterização é o antracito.

O ar de combustão é fornecido por um exaustor localizado abaixo da grelha móvel de sinterização. A combustão se inicia no topo do leito de sinterização pela queima de um gás (que pode ser um gás natural ou até mesmo gás provindo da coqueria da usina) ou óleo em queimadores localizados em cima da máquina de sinterização. Após ignição ocorre a propagação da frente de queima ao longo do leito devido à combustão do coque presente na mistura. A velocidade da frente de queima descreve a velocidade de propagação da combustão ao longo do leito e é considerado um importante parâmetro de caracterização da combustão representando a produtividade da sinterização dos minérios presentes na mistura (WON YANG et al, 2006) <sup>(45)</sup>. Minério de ferro é então sinterizado nas regiões de elevada temperatura que denominamos de zona de combustão. O combustível presente na mistura de sinterização é o responsável pela propagação da frente de combustão ao longo do leito a partir da ignição até a finalização do processo de sinterização sem que haja nenhum suprimento de calor externo (WON YANG et al, 2006) <sup>(45)</sup>. A propagação da frente de queima ocorre lentamente sendo que para um leito de 100 m de altura o tempo de sinterização gira em torno de 30 a 60 minutos (WON YANG et al, 2005) <sup>(46)</sup>. Abaixo da frente de combustão ocorre a

evaporação de umidade presente nas partículas sólidas. Abaixo da zona de evaporação ocorre a condensação. A figura 3.12. mostra o mecanismo de deslocamento da frente de queima até a finalização do processo (WON YANG et al, 2003) <sup>(36)</sup>.

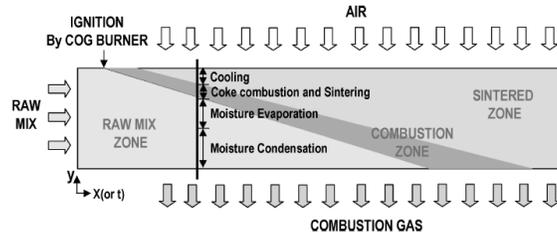


Figura 3.12:

Figura 3.12: Diagrama esquemático do deslocamento da frente de queima do processo de sinterização (WON YANG et al, 2003) <sup>(36)</sup>.

O controle dos parâmetros e o entendimento dos fenômenos presentes no processo de combustão são importantes para o domínio do processo de sinterização.

Muitos trabalhos de pesquisa estudam a queima de coque e o fenômeno de transferência de calor presente ao longo do leito de sinterização visando a previsão e controle de condições operacionais, produtividade e eficiência do processo. Diversos trabalhos sugerem o desenvolvimento de modelos computacionais que representem os fenômenos que ocorrem no processo.

Para o desenvolvimento de modelos computacionais muitos autores consideram em seus trabalhos o leito de sinterização homogêneo e estático, a velocidade de deslocamento da grelha constante e a não interação desta fase com o gás. A partir destas simplificações considera-se o modelo unidimensional da camada sólida da sinterização.

Nesses modelos a transferência de calor ao longo da largura e espessura do leito é desconsiderada. O deslocamento da zona de combustão é considerado apenas ao longo da altura do leito. O modelo considera um regime transiente em que o tempo é transformado em largura do leito pela multiplicação da velocidade da grelha pelo tempo. A abordagem numérica e matemática destes modelos são equações diferenciais parciais.

Resultados de trabalhos de desenvolvimento de modelos e simulações físicas fornecem informações sobre condições de combustão, composição da fase gasosa, qualidade de produtos que podem ser utilizados em benefício do desempenho do processo de sinterização (WON YANG et al, 2006)<sup>(45)</sup>.

MUNCHI, I E HUGUCHI, J., 1970<sup>(47)</sup> desenvolveram modelos computacionais de combustão do coque. CUMMING, M.J. e THURLBY J.A, 1990<sup>(11)</sup> e PATISON, F et al, 1991<sup>(48)</sup> acrescentou interferência da retração da massa da mistura adicionando um fator de retração. NATH, N.K et al, 1997<sup>(49)</sup> preverão o comportamento da zona de amolecimento e fusão da sinterização enquanto que RAMOS, M.V et al, 2004<sup>(50)</sup> preveu de uma maneira mais sistemática mudanças estruturais do leito utilizando método de elemento discreto.

Estes estudos consideram o material sólido como sendo uma única fase o que limita influencias das características e da reatividade do combustível.

Esta é uma abordagem simplista uma vez que diversos tipos de material sólido compõe uniformemente a mistura de sinterização. Cada um dos diferentes materiais sólidos interfere de maneiras distintas na combustão e produtividade do processo. Por exemplo, diferentes tamanhos de partícula e composição dos combustíveis levam a diferenciação do processo de sinterização. Visando cobrir estas questões alguns trabalhos desenvolvem modelos unidimensionais que consideram o leito de sinterização composto por múltiplas fases sólidas e as interferências de cada uma destas fases nas reações de combustão.

WON YANG et al, 2004<sup>(51)</sup> propõe um modelo computacional em que o leito de sinterização é composto por uma fase gasosa e múltiplas fases sólidas incluindo minérios de ferro, coque, calcários e outros aditivos menores. A mistura sólida é considerada homogênea. Cada fase sólida apresenta diferente tamanho de partícula e composição química.

No modelo proposto por WON YANG et al, 2004<sup>(51)</sup> quando as fases sólidas são aquecidas são consideradas as seguintes reações de : secagem, decomposição de calcário, redução de óxido de ferro além das reações relacionada ao combustível. Interações como a transferência de massa e calor entre as fases sólidas e a fase gasosa também são contempladas no modelo.

As variações geométricas consideradas são categorizadas em três partes:

- variações no tamanho das partículas devido as reações e fenômenos físicos como: combustão, fusão e/ou sinterização
- variações na estrutura do leito
- formação de poros.

Já variações de propriedades físicas como: densidade, calor específico, condutibilidade térmica, difusividade, viscosidade tanto das fases sólidas quanto da gasosa influenciam diretamente no resultado do modelo.

Para a validação do modelo foram realizadas simulações físicas em sinter pot.

Este modelo foi ajustado e é capaz de prevê perfis de distribuição de temperatura do leito de sinterização além da composição gasosa. Os resultados numéricos obtidos se aproximam bastante dos obtidos nas simulações físicas realizadas. Foi identificado também sensibilidade do modelo quanto a variação de umidade da mistura e no formato e diâmetro do combustível.

Prosseguindo na mesma linha no trabalho WON YANG et al, 2004<sup>(51)</sup> a sensibilidade do modelo quanto a variações no combustível foi testada.

Economicamente o antracito é bastante atrativo. Torna-se então necessário avaliar os impactos da utilização deste combustível na sinterização. WON YANG et al, 2004<sup>(51)</sup> contempla simulações numérica e física para avaliar impactos no processo considerando dois combustíveis diferentes: coque e antracito.

Monitorando a velocidade de propagação da combustão, o tempo de sinterização e temperatura máxima atingida o estudo determinou impactos nos parâmetros operacionais avaliados devido a diferença de reatividade dos combustíveis. O coque apresentou maior reatividade do que o antracito. Variações na distribuição granulométrica dos combustíveis impactam diretamente na reatividade. Resultados mostram que a diminuição nas partículas do antracito aumentam sua reatividade. (WON YANG et al, 2005)<sup>(46)</sup>.

CASTRO, J.A et al, 2012<sup>(52)</sup> também através do desenvolvimento de um modelo multifásico da sinterização analisa o impacto da troca do fino de coque por

combustíveis gasosos provenientes das mais diversas áreas de uma siderúrgica integrada.

### ***Permeabilidade***

Produtividade da sinterização e qualidade do sinter são extremamente dependente da permeabilidade do leito determinada em primeira instancia pela estrutura do leito durante a sinterização.

A distribuição granulométrica dos grânulos verdes produzidos na etapa de granulação, o formato destes grânulos, e o empacotamento deles influenciam diretamente na porosidade e na permeabilidade do leito (VENKATARAMANA, R. et al, 1998)<sup>(14)</sup>.

Além destes parâmetros abordados ressalta-se também a relação da permeabilidade do leito com a velocidade do gás ao longo do leito, com a queda de pressão neste e com o tempo de sinterização (VOICE, E.W, 1953)<sup>(53)</sup>.

A velocidade de gás ao longo do leito é função da porosidade do leito. A determinação da porosidade por sua vez depende da capacidade de granulação da mistura de sinterização, da formação, distribuição granulométrica e homogeneidade dos grânulos verdes. O mecanismo e os fenômenos de granulação de misturas de sinterização encontram-se discutidos também nesta revisão.

A relação direta da passagem do fluxo de gás no leito com o tempo de sinterização torna este ultimo um parâmetro também crítico para a determinação da produtividade da sinterização (VOICE, E.W, 1953)<sup>(53)</sup>.

O Trabalho proposto por VENKATARAMANA, R. et al, 1998<sup>(14)</sup> propõe um modelo matemático de distribuição granulométrica dos grânulos verdes no leito de sinterização. O modelo é composto pela integração de dois modelos específicos de descrição da granulação da mistura e permeabilidade do leito. Os resultados obtidos no modelo a partir de variações de condições operacionais foram validados por dados obtidos em simulações físicas em laboratório.

### *Taxa de contração*

O conhecimento dos fenômenos inerentes à movimentação das fases sólidas e gasosas no leito de sinterização é importante para o melhor entendimento do processo. A relevância de estudos correlacionados à movimentação das partículas e do gás do leito aumenta quando há abordagem de simulações físicas. Nestes ensaios os impactos gerados pelas movimentações do leito são amplificados. Nesta etapa de revisão bibliográfica a análise será fenomenológica. Na etapa da revisão que aborda as simulações físicas a análise focará os impactos das movimentações no leito do pote (UMEKAGE, T. e YUU, S, 2009)<sup>(54)</sup>.

O empacotamento da fase sólida da mistura de sinterização do leito sofre interferência de acordo com a altura do leito. Tanto a diferença de peso sobre as partículas quanto a menor mobilidade delas aumenta progressivamente a fração de empacotamento à medida que nos aproximamos do fundo do leito. A fração de empacotamento é o principal fator que determina a taxa de retração da mistura. Assim acompanhando o fenômeno físico descrito para o empacotamento a taxa de retração das misturas reduz ao longo da altura do leito (UMEKAGE, T. e YUU, S, 2009)<sup>(54)</sup>. Falhas de contato provocadas por grande diferenças granulométricas entre as partículas é outro fator que determina o movimento das partículas sólidas de um leito de sinterização ocorre devido

Dados os fatores de movimentação analisado percebe-se a grande importância da distribuição granulométrica das misturas. Desmoronamentos do leito, que ocorrem devido a presença de falhas entre zonas do leito são mais frequentes em misturas com baixa participação de partículas grossas. A retração de misturas compostas por partículas maiores é menor do que misturas cuja participação destas partículas é pequena dada a menor variação de volume destas partículas e maior porosidade de misturas com elevada participação delas. Dada a menor densidade das partículas grandes tanto os sinteres quanto o leito formado pela sinterização de misturas com maior participação destas partículas apresentam maior porosidade (UMEKAGE, T. e YUU, S, 2009)<sup>(54)</sup>.

### 3.7 Sinter

O sinter é o produto resultante da sinterização. A qualidade do sinter é um fator chave na determinação da produtividade do alto-forno (DONSKOI, E. et al) <sup>(38)</sup>. Maiores produtividades são obtidas a partir de um aumento percentual da carga preparada, em detrimento do uso de minérios granulados, bem como a partir da manutenção do baixo nível de escória na carga alimentada no alto-forno (NOGUEIRA, R. et al, 2003)<sup>(37)</sup>. O principal objetivo da sinterização é produzir produtos aglomerados resistentes (DONSKOI, E. et al) <sup>(38)</sup>.

LOO, C.E et al,1992<sup>(55)</sup>, e HSIEH, L.H, 2005<sup>(56)</sup> mostraram que as propriedades dos minérios que compõe a matriz de sinterização afetam significativamente as reações de formação de assimilação e fusão e além de influenciar a formação de fases.

Misturas compostas por diferentes minérios resultam em produtos de sinterização que apresentam qualidades diferentes (DONSKOI, E. et al) <sup>(38)</sup>. A qualidade do sinter é definida por propriedades físicas, químicas e mineralógicas.

A composição de sinter de alto teor de Ferro total tem sido descrita por vários autores. Estruturalmente várias fases estão presentes no sinter. Dentre elas podemos citar as magnetitas primárias e secundárias ( $Fe_3O_4$ ), as hematitas primárias e secundárias ( $Fe_2O_3$ ) e as ferritas de cálcio ( $CaO +$  óxido de ferro). Os minerais dominantes são hematitas e magnetita sem uma matriz de escória vítrea. Outras estruturas incluem magnetita e cálcio ferritos, hematita e cálcio ferritos aciculares ou colunares e outras combinações similares.

#### 3.7.1 Sinter abordagem mineralógica

A formação das fases minerais durante a sinterização consiste em um mecanismo complexo. Para o seu entendimento o fenômeno é dividido: (COSTA. E et al, 1995)<sup>(29)</sup>.

- formação da fase líquida entre os grânulos do leito. A fase líquida é constituída por escória (COSTA. E et al, 1995)<sup>(29)</sup>.

- reações entre a escória formada e partículas nucleantes e solidificação do produto resultante (COSTA. E et al, 1995)<sup>(29)</sup>.

A distribuição das fases na estrutura do sinter está diretamente relacionada com a basicidade do sinter. Além da basicidade do sinter a presença de FeO e SiO<sub>2</sub> também são determinantes para a definição da temperatura de fusão do sinter e conseqüentemente em sua definição estrutural. Assim como a basicidade a percentagem de FeO e de SiO<sub>2</sub> funcionam como componentes capazes de abaixar a temperatura de fusão do sinter.

Já a presença de hematita na estrutura do sinter também interfere diretamente nas propriedades do sinter. Podemos relacionar a propensão do sinter à degradação sob redução com sua fração de hematitas. A redução da hematita a magnetita gera uma tensão interna na estrutura cristalina dos óxidos de ferro que leva a degradação da estrutura interna do sinter. A estrutura cristalina do sinter contém hematitas primárias e secundárias. As hematitas secundárias são formadas no veio do sinter durante o resfriamento do sinter na presença do oxigênio do ar, sendo elas as maiores responsáveis pela degradação do sinter.

Além da presença de hematitas, o teor de FeO da mistura de sinterização interfere diretamente na degradação por redução dos produtos de sinterização. Produtos com elevada participação de combustível e conseqüentemente elevado teor de FeO são mais densos e apresentam menor a propensão à degradação sob redução.

Mas apenas a presença de FeO não garante a redução da degradação, pois a presença de MgO e SiO<sub>2</sub> na composição dos minérios reage com o FeO formando estruturas capazes de modificar o comportamento do sinter sob degradação. Por exemplo, em presença de SiO<sub>2</sub> o FeO poderá formar estruturas denominadas fayalitas (2FeO.SiO<sub>2</sub>), estruturas muito estáveis e difíceis de serem reduzidas. Já a presença de MgO leva a formação de espinélio (MgO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com FeO) que são estruturas relativamente fáceis de serem reduzidas.

### 3.7.2 Sinter abordagem química

NOGUEIRA, R. et al, 2003<sup>(37)</sup> mostra a influencia do volume de escória na qualidade do sinter e discute a influencia da basicidade na formação da fase mineral.

Os resultados de ensaios físicos de sinterização realizados considerando três níveis de basicidade mostram que a presença de hematita decresce com o aumento da basicidade enquanto que a magnetita apresentou tendência oposta (NOGUEIRA, R. et al, 2003)<sup>(37)</sup>.

Paralelamente ao aumento da basicidade, tem-se o aumento do percentual de ferrita acicular, em todas as formas. Este aumento tem interferência positiva e direta na redutibilidade do sinter produzido (NOGUEIRA, R. et al, 2003)<sup>(37)</sup>.

A presença de hematita secundária não apresentou tendência ao longo do intervalo de variação do volume de escória o que é positivo, haja vista que a presença deste constituinte é maléfica às propriedades metalúrgicas do sinter produzido (NOGUEIRA, R. et al, 2003)<sup>(37)</sup>.

Já o trabalho desenvolvido por (COSTA. E et al, 1995)<sup>(29)</sup> aborda os efeitos de variações de qualidade química do sinter.

Considerando o diagrama ternário CaO- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> KASAI E. e SAITO F , 1996<sup>(32)</sup>, sugere que a menor temperatura do processo de sinterização encontra-se entre as curvas de sólido e líquido proposto no diagrama.

Através de medições de temperatura de fusão do leito de ensaios (COSTA. E et al, 1995)<sup>(29)</sup> apresenta relações entre a temperatura de fusão e o conteúdo de CaO e SiO<sub>2</sub> das misturas compostas por minérios de elevado teor de ferro. Avalia-se ainda as relações de temperatura de fusão de misturas compostas por minérios de baixo teor de ferro com a adição de CaO.

Presença de sílica na constituição das misturas de sinterização eleva a temperatura de fusão (COSTA. E et al, 1995)<sup>(29)</sup>. Considerando o diagrama ternário CaO- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1984 a adição de fundentes com alto teor de sílica em substituição de minérios (CaO constante) provoca um aumento da temperatura de fusão.

Observando o diagrama nota-se a tendência de redução da temperatura de fusão da mistura com o aumento da basicidade. Os resultados do trabalho (COSTA. E et al, 1995)<sup>(29)</sup> mostram que nem todo aumento de basicidade resulta em uma redução da temperatura de fusão. Sinter formados por minérios ricos apresentaram-se mais refratários em misturas de menor basicidade (COSTA. E et al, 1995)<sup>(29)</sup>.

A comparação das medições de temperaturas de minérios com teores de ferro e impurezas diferentes mostram menor necessidade de adição de CaO para a obtenção da temperatura mínima de fusão

### ***3.7.3 Sinter abordagem física e estrutural***

A determinação das características e a classificação do sinter ocorrem através da realização de ensaios físicos e metalúrgicos como: ensaio de tamboramento, ensaio de shatter, ensaio de degradação sob redução, e ensaio de índice de redutibilidade.

#### ***Resistência de sinter frio:***

A resistência de sinter é dada pela resistência dada pela presença de fase vítrea e poros. Pequena resistência da fase vítrea e grande presença de poros requer elevado consumo de coque com o objetivo de aumentar a força de coesão das partículas e reduzir a porosidade.

(COSTA. E et al, 1995)<sup>(29)</sup> comparou o sinter produzido por um minério hematítico com sinter produzido por minério magnetítico. O sinter hematítico apresentou maior índice de coesão.

Foi avaliado ainda sinter produzidos com diferentes proporções de matriz (SFCA com fase vítrea). Quanto maior a presença de matriz menor a resistência a frio do sinter devido a presença dos macroporos. De acordo com LOO, C.E et al, 1992<sup>(55)</sup> a propagação de fissuras no sinter é inversamente proporcional a presença de fase vítrea e SFCA. MATSUNO, F. et al., 1981<sup>(57)</sup> mostrou que pequenos poros ao redor da hematita

secundária reduzem a propagação de fissuras. Assim a presença de pequenas quantidades de hematitas secundárias, grandes quantidades de cálcio ferritas e ganga aumenta a resistência do sinter.

O trabalho de (NOGUEIRA, R. et al, 2003)<sup>(37)</sup> aborda resultados de testes de resistência de sinter a frio em relação a basicidade da mistura. A queda de resistência a frio e resistência a quente do sinter são fatores limitantes na diminuição do volume de escória.

A diminuição do volume de escória influenciou fortemente a resistência mecânica do sinter. Essa influência é atribuída à redução do teor de CaO, composto fundamental para a formação de constituintes de alta resistência na escória (NOGUEIRA, R. et al, 2003)<sup>(37)</sup>.

#### ***3.7.4 Sinter uma abordagem metalúrgica***

O índice de redutibilidade informa a porcentagem de oxigênio que é removido do sinter após a realização do ensaio. A redutibilidade do sinter está diretamente relacionada com sua porosidade. A consideração da redutibilidade do sinter utilizado no alto-forno impacta diretamente o consumo de coque do processo de redução. Altas redutibilidades de sinter correspondem a menor consumo de coque rate no forno (COSTA. E et al, 1995)<sup>(29)</sup>.

A redutibilidade do sinter é caracterizada pela perda de massa de sinter medida após os ensaios de redução que reproduzem as condições da zona de redução indireta do alto-forno (COSTA. E et al, 1995)<sup>(29)</sup>.

NOGUEIRA, R. et al, 2003<sup>(37)</sup> avaliou o impacto do volume de escória e basicidade no índice de redutibilidade do sinter formado, também através de ensaios.

Os ensaios de redutibilidade foram realizados considerando três níveis de basicidade: alta, média e baixa. O índice de redutibilidade foi sensível a basicidade e influenciado pelo volume de escória. A queda de resistência a frio e resistência a quente do sinter são fatores limitantes na diminuição do volume de escória. O aumento do índice de redutibilidade em basicidade alta pode ser explicado pelo aumento da ferrita de cálcio acicular, estrutura esta capaz de conferir ao sinter o aumento de redutibilidade.

### 3.8 Simulação Física

A realização de testes relacionados a ajustes de parâmetros operacionais ou a avaliação de novas composições de misturas em plantas industriais de sinterização são limitados, pois o processo industrial deve se manter estável e contínuo focado na produção do sinter para alimentar o alto-forno. (BALL, D.F et al, 1973) <sup>(6)</sup>.

Para a realização de ensaios de avaliação de variações na sinterização são desenvolvidas metodologias de simulações físicas em menor escala do processo. As metodologias consistem em apparatus capazes de isolar uma secção íntera do leito de sinterização e reproduzir os mecanismos e fenômenos da sinterização. O sucesso da aplicação destas metodologias é devido a facilidade atribuída a redução de escala do processo uma vez que é possível a reprodução fiel da sequencia operacional do processo de sinterização da composição física e química da mistura e do fluxo de ar (volume de ar por minuto por unidade de área do leito) praticados na planta industrial.

Ou seja, as simulações físicas reproduzem o processo de sinterização da planta industrial e buscam estimar seu comportamento frente a variações na qualidade das misturas e em parâmetros de processo. As simulações físicas produzem o sinter em quantidades suficientes para que sejam feitos testes físicos e químicos de avaliação de suas propriedades. Estas caracterizações também são fieis às caracterizações realizadas para o sinter industrial. Dentre os procedimentos de caracterização dos produtos realizados industrialmente e reproduzidos nos ensaios de simulação física podemos citar: ensaios de determinação de índice de tamboramento, ensaios de avaliação de degradação sob redução, ensaios de determinação da redutibilidade do sinter.

Além de auxiliar a manutenção da estabilidade do processo industrial a aplicação de metodologia de simulações físicas reduz o risco tecnológico de variações de parâmetros da sinterização ou até mesmo na composição das misturas de sinterização a um baixo custo.

Diversos estudos utilizam de metodologias de simulação física na verificação de ajustes a serem aplicados na planta industrial. Estas metodologias também surgem como

ferramentas poderosas na calibração e validação de modelos matemáticos propostos também com objetivo de estimar variações no processo industrial.

Tanto industrialmente quanto em simulações físicas a avaliação do desempenho das misturas de sinterização está diretamente relacionada tanto com as propriedades físicas e químicas de cada um dos minérios presentes quanto com a quantidade e propriedades de outros componentes presentes na mistura como: combustível e fundentes.

A avaliação do processo durante as simulações físicas é feita através do controle de alguns parâmetros de processos como: produtividade, temperatura e consumo de combustível.

Estudos envolvendo simulações físicas em planta piloto de sinterização (sinter pot test) são realizados frequentemente com objetivo de avaliar o desempenho de misturas de sinterização, o comportamento das variáveis do processo de sinterização e o impacto na qualidade do sinter produzido. Diferentes metodologias de simulações físicas do processo de sinterização são desenvolvidas para a avaliação de impactos na sinterização.

Apesar de muito apresentarem montagens muito semelhantes em geral as metodologias de simulação diferem tanto no dimensionamento do equipamento em que ocorre a etapa de granulação quanto no dimensionamento do pote (equipamento em que ocorre a queima).

A figura 3.13 mostra um diagrama esquemático típico da montagem de uma metodologia de simulação física (BALL, D.F et al, 1973) <sup>(6)</sup>.

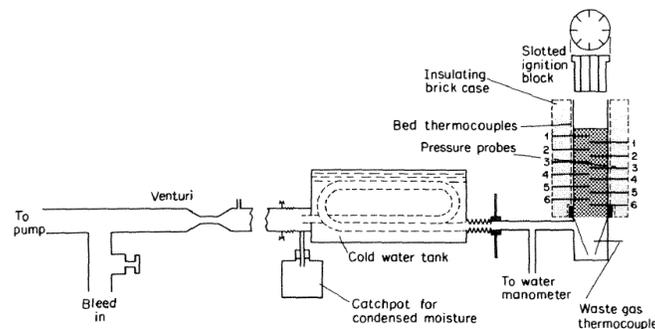


Figura 3.13: Diagrama esquemático de um ensaio físico de sinterização (BALL, D.F et al, 1973)

O sinter pote é geralmente um cilindro de aço que é fixado em uma base com grelha acoplada a um exaustor. Lateralmente os potes possuem furos que permitem a medição de parâmetros de processo como temperatura, pressão de sucção e composição de gás. Existe equipamento acoplados ao topo do cilindro para medir o volume de ar entrando no pot. Antes de ser carregada no pote as misturas são granuladas pela adição de água em tambores rotativos. Estes tambores são dimensionados de acordo com os parâmetros da metodologia de simulação física escolhida. Antes do carregamento da mistura há a adição da camada de forramento do pote. Acontece também no topo do pote a aproximadamente 1320°C pela queima de gás. É normal manter o fluxo de ar constante durante a ignição de forma a criar condições de ignição da mistura independentemente da permeabilidade do leito. Após a ignição pode-se manter a sucção ou o fluxo de ar constante. Usualmente é mantida a sucção constante devido a realização desta prática em plantas industriais. Durante a queima da mistura as medições são efetuadas e o final da simulação ocorre quando se atinge um pico da temperatura do gás da caixa de vento. (BALL, D.F et al, 1973)<sup>(6)</sup>

Os mais diferentes dimensionamentos são propostos. Havendo metodologias extremas que requer 230 kg de mistura de sinterização ( cilindro com 610mm de diâmetro) enquanto que outras consomem apenas 1kg de amostra (cilindro com 76mm de diâmetro). WON YANG et al, 2004<sup>(51)</sup> propõe uma metodologia intermediária de simulação cujos potes com 205mm de diâmetro e 600mm de altura.

Diversas outras metodologias são propostas. A escolha de uma metodologia esta relacionada com o escopo do trabalho e com a quantidade de material disponível. A definição das variáveis de processo a serem monitoradas também é importante dadas as maiores imprecisões e sensibilidades de algumas variáveis frente metodologias de pequena escala.

Apesar do uso de simulações físicas difundido para avaliação de misturas e/ou do processo de sinterização pouco se discute a cerca das semelhanças ou distorções atribuídos à variação do dimensionamento dos equipamentos tanto em relação a etapa de granulação quanto em relação a etapa de queima da mistura. As abordagens são sempre na linha de descrever e avaliar uma metodologia de simulação física perante as condições propostas. Raramente busca-se relações comparativas entre duas diferentes

metodologias ou a definição de limitações ou ganhos da utilização de uma metodologia em detrimento de outra.

O trabalho desenvolvido por RAVAT, Y. F. et al, 1979<sup>(58)</sup> descreve o comportamento de diversos parâmetros operacionais monitorados em simulações física de sinterização destacando o comportamento de muito dos parâmetros em simulações físicas de menor escala. Apesar das metodologias que contemplam equipamentos de pequena escala serem capazes de reproduzirem o processo essas metodologias mostram maior fragilidade a variações em parâmetros operacionais do processo de sinterização o que interferem diretamente na qualidade do sinter produzido. RAVAT, Y. F. et al, 1979<sup>(58)</sup>.

Assim o monitoramento de parâmetros da sinterização é importante para se obter uma determinada qualidade de sinter.

➤ Distribuição de temperatura no leito de sinterização:

Os perfis de temperatura da sinterização de misturas de minérios tanto para queimas industrial quanto para os ensaios de simulação física são bastante semelhantes. Os perfis de temperatura obtidos ao longo do processo de sinterização são em geral curvas que indicam o aumento contínuo da temperatura até um valor máximo (pico) a partir do qual a temperatura começa a diminuir. Geralmente tanto em ensaios piloto de menor escala quanto em sinterizações de escala industrial a temperatura do gás é medida na caixa de vento. O aumento contínuo de temperatura ocorre devido ao deslocamento da frente de queima ao longo do leito de sinterização e a aproximação desta frente da caixa de vento. O pico de temperatura indica a combustão de todo o combustível do leito de sinterização. A partir deste ponto o leito começa a resfriar pela passagem do ar de exaustão indicando a queima completa da mistura presente no leito de sinterização. Também para ambas as escalas de sinterização a inclinação das curvas de perfil de temperatura influencia diretamente a qualidade física do sinter produzido, pois indica a rapidez e o nível térmico que o processo de sinterização foi conduzido.

➤ Adição de finos de coque na mistura:

Variações na percentagem de combustível das misturas de sinterização interferem diretamente em parâmetros do processo de sinterização e na qualidade física e química do sinter produzido. O combustível presente na mistura é responsável pelo teor de FeO presente no sinter. A quantidade de combustível presente na mistura interfere

diretamente na resistência do produto formado. Aumento da quantidade de combustível reduz a redutibilidade e elevada resistência devido ao aumento do nível térmico da sinterização.

➤ Finos de Retorno:

Variações na quantidade de finos de retorno da mistura de sinterização interferem diretamente na permeabilidade do leito e conseqüentemente na distribuição de calor ao longo dele e em sua contração culminando em alterações da resistência e na redutibilidade do sinter.

➤ Basicidade:

Variações na composição da mistura de sinterização de forma a afetar a basicidade do sinter interferem diretamente em sua redutibilidade e em sua resistência. O aumento da basicidade do sinter apesar de diminuir do teor de ferro da escória devido a formação de ferritas e a redução de magnetita livre melhora a redutibilidade e a resistência do sinter.

➤ Umidade:

A adição de umidade à mistura de sinterização aumenta a produtividade do processo, pois favorece aglomeração das partículas aumentando permeabilidade da mistura. Mas diferentemente do esperado, excesso de umidade na mistura acaba sendo prejudicial à aglomeração das partículas afetando diretamente a permeabilidade do leito.

➤ Altura do leito de sinterização e pressão de sucção:

A altura do leito de sinterização e a pressão de sucção são dois parâmetros inversamente proporcionais. O aumento na altura do leito de sinterização aumenta o tempo de sinterização. Já o aumento da pressão de sucção eleva a produtividade. Assim os efeitos do aumento da camada do leito podem ser neutralizados com o aumento adequado da pressão de sucção de forma a manter a produtividade constante.

Outros estudos comparam diferentes metodologias de simulação física. Nestes estudos parâmetros de sinterização e impactos na qualidade do sinter são avaliados e as diferenças entre as metodologias destacadas. O trabalho desenvolvido por LOO, C. E. et al, 2004<sup>(59)</sup> compara resultados de metodologias de sinterização piloto de diferentes escalas entre si e com respostas de uma sinterização industrial. Além da análise de

parâmetros do processo de sinterização, as respostas das sinterizações são obtidas a partir da caracterização dos produtos obtidos. Para a caracterização foram considerados ensaios de tamboramento, redutibilidade, degradação sob redução, shatter. A análise comparativa dos diferentes processos de sinterização foi feita tanto em relação à qualidade do sinter quanto em relação aos parâmetros de processo.

De acordo com LOO, C. E. et al, 2004 <sup>(59)</sup> é esperado que a perda de calor, e a consequente redução da temperatura da frente de queima, em simulações física de menor escala sejam maiores do que na planta industrial e do em simulações de maior escala. Ou seja, quanto menor o dimensionamento do ensaio maior a perda de calor. Isso ocorre, pois à medida que a mistura é queimada há uma contração de sua massa. Devido à essa contração a formação de caminhos preferenciais de ar através das paredes do pot (efeito parede) ocorre mais facilmente em ensaios de menor escala. Outro fator que auxilia a maior perda de calor em simulações física de menor escala é que estas simulações apresentam proporcionalmente maior área de transferência de calor (parede) por unidade de massa de sinter o que facilita a perda de calor.

Metodologias de simulação física de diferentes escalas apresentam variações em parâmetros de processo e conseqüentemente na qualidade do sinter que produzem.

De acordo com os resultados discutidos em LOO, C. E. et al, 2004 <sup>(59)</sup>, a resistência do sinter obtido em plantas industriais é maior do que os obtidos pela aplicação de metodologias de simulações físicas de menor escala. A menor taxa de troca de calor por unidade de área das simulações de menor escala provoca um resfriamento mais rápido do sinter o que provavelmente contribui para a redução da resistência do produto. A menor resistência do sinter aumenta a geração de finos o que conseqüentemente reduz a produtividade das sinterizações de menor escala. A maior geração de finos, por sua vez eleva a dosagem de combustível, e conseqüentemente no teor de FeO do sinter na mistura, modificando a necessidade de umidade da mistura durante a micro aglomeração.

## 4 Metodologia

A metodologia do trabalho contempla a realização de simulações físicas de misturas de sinterização tanto sob as diretrizes da metodologia do mini pot test quanto sob a metodologia do sinter pot test.

O conjunto de misturas de sinterização considerado foi definido através da realização de cálculos de balanço de massa do processo de sinterização. Práticas operacionais realizadas em usinas siderúrgicas chinesas, japonesas e europeias, foram utilizadas como direcionadores na composição das misturas de sinterização. Assim, além das reações químicas típicas do processo o balanço de massa para a composição das misturas contempla diferentes tipos e participações de minérios e diferentes qualidade desejadas do produto final.

A metodologia deste trabalho busca a maior variabilidade entre as misturas de sinterização. Tanto em relação aos tipos de minérios utilizados, quanto a qualidade deles como também quanto a qualidade final do produto de sinterização (sinter) visada após a queima das misturas. Para atender a variabilidade do trabalho foram compostas diversas misturas de sinterização a partir das premissas de praticas operacionais dos mercados em questão e da análise química dos minérios disponíveis para a realização do trabalho. Assim foi composto, por calculo de balanço de massa, um conjunto de mistura de sinterização.

O domínio de qualidade física e química destas misturas é bastante abrangente, contemplando misturas com diferentes participações de minérios, características físicas e químicas. Assim será possível após a realização do programa de trabalho avaliar os impactos no processo de sinterização devido a variações na mistura e o comportamento das duas metodologias de simulação física frente a misturas com diferentes características.

Para a realização do programa de ensaio desenhado para a avaliação de ambas as metodologias de simulação física serão selecionadas cinco mistura. Estas misturas serão selecionadas buscando representar um grupo de misturas do domínio composto através do balanço de massa, de forma a simular diferentes práticas operacionais e avaliar a sensibilidade das metodologias de simulação física sob diferentes condições.

Ao longo dos ensaios as principais variáveis de processo monitorada nas simulações serão: permeabilidade/ produtividade, distribuição granulométrica da mistura granulada, distribuição granulométrica de minérios, resistência dos grânulos, tempo de sinterização, produtividade de sinter, rendimento de sinter e consumo de combustível

Já a avaliação da qualidade do sinter é determinada pelo seu desempenho físico, químico e metalúrgico.

A análise comparativa das variáveis de processo e da qualidade dos produtos obtidos permitirá o desenvolvimento de modelos matemáticos de correlação das variáveis obtidas em ambas as metodologias.

#### **4.1 Misturas de sinterização**

A mistura de sinterização é geralmente composta por: matriz de sinterização (diversidades de Sinter Feed), combustíveis sólidos, fundentes, umidade e resíduos siderúrgicos. A composição do conjunto de misturas de sinterização deste trabalho é baseada apenas na variação da matriz de sinterização e fundentes.

As composições das misturas de sinterização foram obtidas inicialmente a partir de um cálculo de balanço de massa em que foram consideradas as principais reações químicas do processo, práticas operacionais atuais de usinas siderúrgicas dos mercados chinês, japonês e europeu. As principais práticas consideradas para a composição das misturas foram:

- Minérios típicos de cada mercado. Para a caracterização dos minérios foram consideradas qualidades físicas e químicas;
- Participação típica dos diferentes minérios considerados nas cargas representativas de cada mercado;
- Fundentes típicos de cada mercado;
- Qualidade visada do produto de sinterização. Como basicidade, quantidade de combustíveis, fundentes, teor de  $\text{SiO}_2$  do sinter, Teor de  $\text{FeO}$  e  $\text{MgO}$ ;

#### 4.1.1 Equacionamento de balanço de massa de sinterização

O conjunto de misturas de sinterização considerado foi definido através da realização de cálculos de balanço de massa do processo de sinterização. A ferramenta utilizada para os cálculos foi o software Microsoft Office Excel 2003.

A equação 4.1 foi utilizada como base para o cálculo do balanço de massa para cada um dos compostos químicos presentes na mistura de sinterização ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $MnO$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $P_2O_5$ ,  $Fe_2O_3$  e PPC). A equação considera o somatório da participação de cada composto nas matérias-primas (matriz de minérios, aditivos e fundentes) contempladas na mistura de sinterização. Na equação a variável  $qtde\_mp$  representa a participação de todas as matérias-primas considerada na mistura de sinterização. A variável  $\% CompQuim$  representa a composição de cada matéria-prima quanto ao composto considerado.

$$\sum_{\substack{mp \in \text{misturadasinterização} \\ \forall CompQuim \in \{Fe, Al_2O_3, SiO_2, Mn, P, CaO, MgO, PPC\}}} qtde\_mp * \% CompQuim \quad (4.1)$$

Para o cálculo de balanço de massa considerou-se também as reações químicas típicas do processo de sinterização (eq 3.1 a eq 3.8) como as reações de calcinação, de hidratação da cal, de condensação dos vapores de água, de desidratação do hidróxido de cálcio, de vaporização da umidade combustão do carbono, decomposição dos carbonatos, reações na fase sólida, redução e re-oxidação dos óxidos de ferro e reações de formação da escória.

No equacionamento do balanço de massa considerou-se como premissa a reversibilidade das reações de oxi-redução durante a sinterização. Ou seja, a quantidade dos compostos  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $MnO$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $P_2O_5$  presente nos minérios inicialmente que compõe as misturas é mantida no modelo após o processo de sinterização.

O componente químico PPC contabiliza as perdas por calcinação dos compostos carbonatados originários principalmente dos insumos.

A reação reversível da hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) reduz formando a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e oxida novamente a hematita. No balanço de massa foi considerado um grau de redução da hematita, considerando a existência de FeO remanescente no sinter. A quantidade de FeO no sinter é definido como um input do balanço de massa.

#### ***4.1.2 Identificação e caracterização de minérios***

Para a composição das matrizes de sinterização foram coletadas amostras de minérios tipicamente utilizados em sinterizações dos mercados chinês, japonês e europeu.

Apesar de ser enorme a produção de minérios chineses estes são pouco ofertados internacionalmente devido ao seu grande consumo em seu mercado interno. Nos últimos tempos, a crescente demanda do mercado chinês impulsionou a entrada de produtos internacionais neste mercado elevando a necessidade de se conhecer e avaliar melhor os produtos chineses.

Assim, com o intuito de representar o cenário atual da siderurgia além de explorar representantes dos tradicionais players do mercado fornecedor de minério de ferro como australianos e brasileiros este trabalho também considera minérios chineses, africanos e indianos.

A tabela 4.1 relaciona os representantes de cada mercado produtor de minério de ferro considerado no trabalho para a realização das simulações.

Tabela 4.1: Identificação e determinação da origem dos minérios utilizados na composição das misturas de sinterização.

Origem	Minérios amostrados				
	Africano	Brasileiro	Australianos	Indianos	Chinês
<b>Minérios</b>	AFR 1	BRA 1	AUS 1	IND 1	CHI 1
		BRA 2	AUS 2	IND 2	CHI 2
		BRA 3	AUS 3		CHI 3
		BRA 4	AUS 4		CHI 4
		BRA 5	AUS 5		CHI 5
					CHI 6
					CHI 7
					CHI 8
					CHI 9

Foram obtidas amostras de diferentes players de minérios de cada um dos mercados considerados. Todas as amostras foram caracterizadas quanto sua qualidade química, e sua distribuição granulométrica.

Nesta caracterização serão considerados os teores de  $Al_2O_3$ ;  $SiO_2$ ; Fe total e a Distribuição granulométrica: (+6.3mm); (-6.3; +1mm); (-1,0; +0,15mm), (-0,15mm) de cada um dos minérios.

Para a obtenção da análise granulométrica das amostras adotou-se o método de peneiramento a seco e a úmido. Já análise química das amostras foi feita através do método de difração de raio-x. A análise química e granulométrica completa das amostras dos minérios considerados na composição das amostras encontram-se detalhadas na tabela 9.1 do anexo 1.

Os gráficos das figuras 4.1 e 4.2 mostram respectivamente a qualidade química e física dos minérios analisados no trabalho. A figura 4.1 mostra o gráfico da qualidade química dos minérios de cada mercado amostrados para a composição das misturas de sinterização.

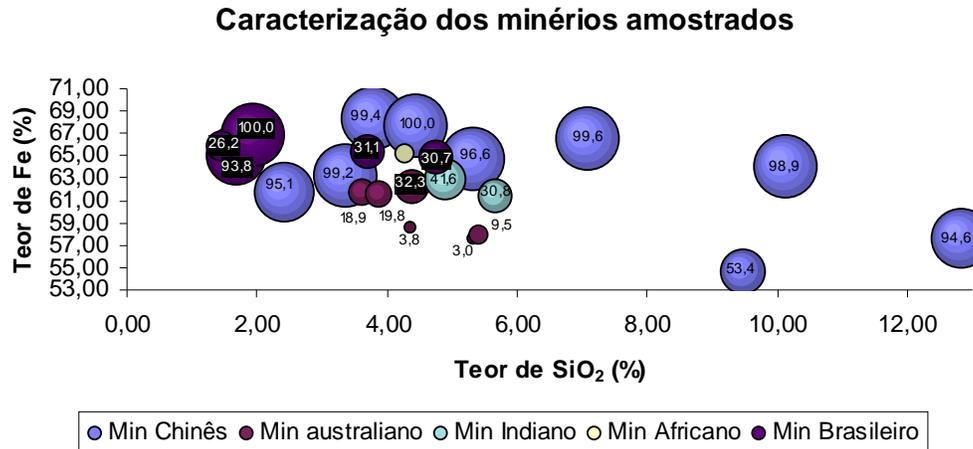


Figura 4.1: Gráfico da caracterização química dos minérios amostrados para a composição das misturas de sinterização

No eixo x do gráfico encontram-se os valores de sílica dos minérios e no eixo y do gráfico os teores de ferro. O tamanho da bola representa a quantidade de material fino (< 0,25 mm) presente nas amostras de minério, quanto maior a bola maior a quantidade de fino presente no minério.

Já o gráfico da figura 4.2 mostra a qualidade física dos minérios de cada mercado amostrados para a composição das misturas de sinterização. Este gráfico relaciona a participação de partícula grossa maior que 6,3 mm com a percentagem de material cuja granulometria é menor que 1,0mm e maior que 0,25mm com a percentagem de material fino presente em de cada minério.

No eixo x do gráfico foi plotado a percentagem de material cuja granulometria é menor que 1,0mm e maior que 0,25mm e no eixo y a de material maior grosso. O tamanho da bola representa a quantidade de material fino presente nas amostras de minério, quanto maior a bola maior a quantidade de fino presente no minério.

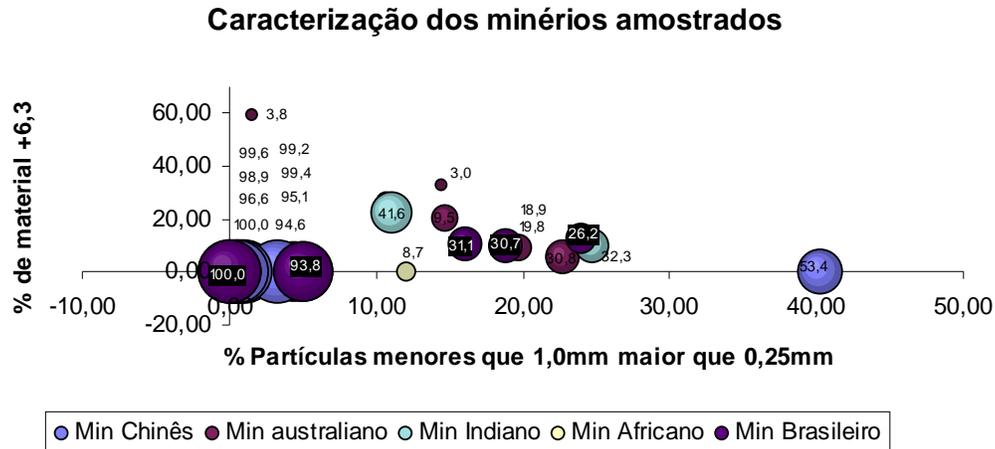


Figura 4.2: Gráfico da Caracterização granulométrica dos minérios amostrados para as composições das misturas de sinterização.

Os dados mostram a grande variabilidade química e granulométrica entre os minérios amostrados para a execução do trabalho. A elevada variabilidade é observada tanto entre minérios de diferentes mercado quanto entre minérios de um mesmo mercado.

Essa diversidade entre os minérios é importante, pois quanto mais abrangente o domínio de qualidade dos minérios disponíveis para a composição das misturas de sinterização maior a variabilidade do conjunto de as misturas de sinterização contempladas no trabalho e maior a diversidade operacional avaliada.

A seguir são feitas considerações sobre a variabilidade, qualidade física e química entre os principais representantes de cada mercado fornecedor de minério.

### *Minérios Chineses*

A maioria dos minérios chineses são magnetíticos. Comparado aos demais mercados grande parte dos minérios chineses apresenta elevada participação de partículas finas em sua composição. Devido a esta características são denominados “concentrados”. A grande maioria dos representantes de minérios chineses apresenta quantidade de partículas fina maior que 95%. Como pode ser observado nos dados da figura 4.2. A presença de material grosso (+ 6,3mm) e material cuja granulometria é menor que

1,0mm e maior que 0,25mm nestes tipos minério é bastante reduzida, próximo de zero, conforme pode ser visto no gráfico. Mas mesmo entre representantes deste mercado observamos um representante com apenas 53% de partículas finas.

A variabilidade dos minérios chineses quanto à qualidade química é ainda maior. Como pode ser observado nos dados da figura 4.1. Nota-se representantes com diferentes teores de ferro variando de 54% a 69%. O mesmo pode ser observado para o teor de impureza destes minérios. SiO<sub>2</sub> varia de 2 a 12%. Uma peculiaridade comum aos concentrados chineses analisados é o baixo teor de alumina (menor que 1%).

Como pode ser observado na figura 4.1, a maioria dos minérios apresentam elevado teor de ferro inversamente proporcional ao teor de impurezas (sílica e alumina). Esta tendência é comumente observada em sinter feeds brasileiros e australianos. Mas, esta tendência não é regra para os concentrados chineses. Além de minério que apresentam a mesma tendência alguns minérios chineses apresentam elevado teor de ferro e elevado teor de sílica. Por exemplo, o minério que apresenta 63% de ferro e sílica acima de 7%.

### ***Minérios Brasileiros, Australianos, Indianos e Africanos***

Observando os gráficos das figuras 4.1 e 4.2 percebe-se grande semelhança granulométrica entre os minérios australiano, indianos, africanos e alguns exemplares brasileiros. Geralmente, os minérios destes mercados são hematíticos apresentando baixo teor de FeO. Apresentam ainda granulometria típica de sinter feed com maior presença de partículas grossas. De 5 a 20% de material de granulometria maior que 6,3 mm e de 10 a 25% de cuja granulometria varia de -1,0 a +0,25mm. Esses minérios apresentam teor sílica entre 4 e 6 % e teor de ferro de 62 a 65 % de ferro.

Considerando os produtos brasileiros percebe-se a formação de dois grupos de minérios quando consideramos a granulometria apresentada.

O primeiro grupo é composto por minérios geralmente mais finos (acima de 95% de partículas finas) com teores de ferro mais elevado (acima de 65%), muito semelhante aos concentrados chineses. Características típicas de pellets feed brasileiros cujo teor de

sílica (em torno de 2%) é menor do que os concentrados chineses e o teor de alumina (1,5%) maior.

Já o segundo grupo apresenta características granulométricas típicas de sinter feed. Observando o conjunto de sinter feeds brasileiros percebem-se exemplares com qualidades bem distintas. Apesar de granulometricamente semelhantes um dos exemplares apresenta teor de sílica sensivelmente reduzido em relação aos outros, menor que 2%. Devido a redução no teor de sílica este sinter feed apresenta elevado teor de ferro, aproximadamente 66%. Os demais brasileiros apresentam teores de ferro em torno de 64%, de sílica maior que 4% e de alumina menor que 1,5%.

O teor de alumina elevado é a principal peculiaridade dos sinter feeds australianos. Os minérios considerados apresentam teores que ultrapassam 2,0%. Já os teores de  $\text{SiO}_2$  e ferro estão bastante variados, existindo minérios de baixo e médio teor de ferro com sílica variando de 3,5 a 5,5 %.

Os sinter feeds indianos são bastante semelhantes entre si. Quando comparado com concorrentes internacionais se aproximam de representantes australianos, devido a seu elevado teor de alumina.

Já o mercado produtor africano é representado por um minério bastante semelhante a sinter feeds brasileiros, apresentando alto teor de ferro, em torno de 65%, alumina em torno de 1,0% e sílica em torno de 4,0%.

#### ***4.1.3 Qualidade visada do sinter***

##### ***SiO<sub>2</sub> e Basicidade do sinter***

Para este trabalho foram definidos três intervalos de teor de  $\text{SiO}_2$  e a basicidade do sinter a serem visados no balanço de massa da composição das misturas de sinterização. Estes valores foram baseados em práticas operacionais de usinas siderúrgicas Chinesas, japoneas e européias. Os intervalos definidos para as simulações são:

- % $\text{SiO}_2$  menor que 3.3; basicidade 3.00;

- % SiO<sub>2</sub> de 4.5 a 6.0 basicidade 1.90;
- % SiO<sub>2</sub> maior que 6.0 basicidade 1.70.

### ***MgO do Sínter***

O teor de MgO do sinter visado no balanço de massa da composição de todas as misturas de sinterização foi o mesmo 1,5%. O ajuste do MgO do sinter foi feito por adição de fundentes à mistura de sinterização, como por exemplo o calcário dolomítico.

### ***FeO do Sínter***

O teor de FeO das misturas de sinterização é proporcional ao teor de FeO presente nos minérios e à presença deste composto no combustível da mistura.

O teor de FeO da mistura é ajustado pela adição de combustível à mistura. Neste trabalho, para a realização do balanço de massa estipulou-se inicialmente o teor de 8% de FeO nas misturas.

Mas, este valor foi apenas um valor inicial para o fechamento de balanço de massa. Para as cinco misturas selecionadas este provavelmente não será o valor do FeO, pois o programa de ensaios deste trabalho contempla o ajuste de finos de retorno em 30%. Como este ajuste é feito pela dosagem de combustível na mistura, o teor de FeO final da mistura válida será único para cada mistura e dependerá da produção de finos de retorno de cada mistura.

### ***Combustível***

Da mesma forma que o FeO a dosagem de combustível só será definida em 4% para o fechamento do cálculo o balanço de massa das misturas. O consumo de combustível de cada mistura será determinado apenas após o ajuste de finos de retorno em 30%.

A qualidade física e química dos fundentes utilizados e na composição das misturas e do combustível previsto para o processo de sinterização encontra-se na tabela 9.2 do anexo 1.

### ***Fundentes***

Os tipos de fundentes disponíveis para cada mistura são definidos de acordo com as práticas dos mercados avaliados. Já a demanda de fundentes em cada mistura é definida através do cálculo do balanço de massa em que os fundentes são dosados de acordo com a qualidade visada do sinter.

Os principais fundentes utilizados para o ajuste de qualidade são: calcário calcítico, calcário dolomítico, cal, quartzo, dolomita entre outros.

### ***Cal***

No conjunto de simulações previstos neste trabalho a cal será mantida constante em 3% da mistura de sinterização. É importante manter este componente da mistura constante para todas as misturas avaliadas para não mascarar o efeito de afinamento da mistura prejudicial à sinterização, devido a entrada de minérios com granulometria mais fina.

### ***Umidade***

Para o cálculo do balanço de massa a umidade foi estipulada em 7%. Assim como a definição do teor de FeO e o consumo de combustível esta variável será ajustada durante a realização dos ensaios de obtenção de simulação válida. O programa de ensaios visa a obtenção da umidade ótima de cada uma das misturas consideradas no trabalho. Considera-se ótima a umidade da mistura de sinterização em que se atinge a melhor granulação da mistura e conseqüentemente a melhor permeabilidade do leito e maior produtividade da sinterização.

### ***Resíduos siderúrgicos***

Em uma usina siderúrgica recolhem-se todos os possíveis resíduos gerados ao longo do processo. Devido a flexibilidade do processo de sinterização de adicionar aditivos e fundentes a mistura de acordo com o objetivo de qualidade do sinter visado, cabe a sinterização absorção e a recuperação destes resíduos. Neste trabalho não será considerado a adição de resíduos siderúrgicos na mistura de sinterização.

A qualidade física e química dos fundentes utilizados e na composição das misturas e do combustível previsto para o processo de sinterização encontra-se na tabela 9.2 do anexo 1.

#### ***4.1.4 Conjunto de misturas de sinterização compostas***

A partir do balanço de massa e considerando as práticas dos mercados considerados foi composto um conjunto de quarenta e cinco misturas de sinterização. O cálculo de balanço de massa considerou todos os minérios disponíveis de forma a varrer o domínio de restrições de qualidade física e química visada para os sinters além das variações de qualidade e participação dos minérios.

Qualidade química do sinter visado de cada balanço de massa assim como a granulometria final de cada mistura foram dispostos em gráficos para o melhor dimensionamento da variabilidade e o domínio de abrangência das misturas.

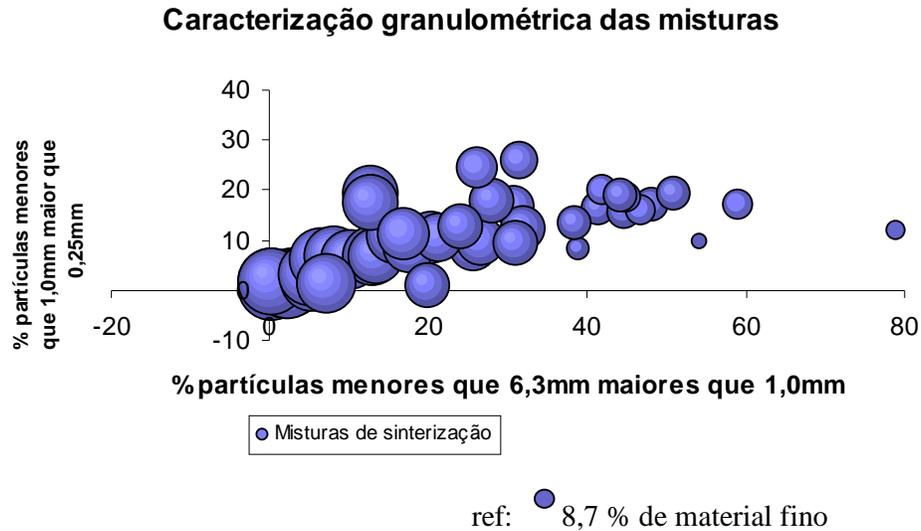


Figura 4.3: Gráfico da caracterização granulométrica do conjunto de misturas compostas

A figura 4.3 mostra o gráfico com a granulometria resultante de cada mistura. No eixo x do gráfico encontram-se a participação de partículas com granulometria menor que 6,3mm e maior que 1,0mm e no eixo y do gráfico a participação de partículas cuja granulometria é menor do que 1,0mm e maior que 0,25mm. O tamanho da bola representa a quantidade de material fino (< 0,25 mm) presente nas amostras de minério, quanto maior a bola maior a quantidade de fino presente no minério.

Observa-se que misturas mais grossas apresentam maior presença de partículas nucleantes (partículas cuja granulometria está entre  $-6,3\text{mm} < x < +1,0\text{mm}$ ) e intermediárias (partículas cuja granulometria está entre  $+1,0\text{mm} < x < -0,15\text{mm}$ ) enquanto que misturas mais finas apresentam uma redução nas partículas nucleantes e intermediárias. Mas granulometricamente pode-se considerar o conjunto de misturas bastante diversificado, atendendo a variabilidade visada no trabalho.

A figura 4.4 mostra o gráfico da qualidade química prevista para os produtos de sinterização de cada uma das misturas compostas a partir do balanço de massa. O gráfico mostra a relação do teor de sílica e alumina das quarenta e cinco misturas de sinterização. No eixo x do gráfico encontram-se os valores de sílica das misturas e no

eixo y do gráfico os teores de alumina. O tamanho da bola representa a basicidade das misturas, quanto maior a bola maior a basicidade da mistura.

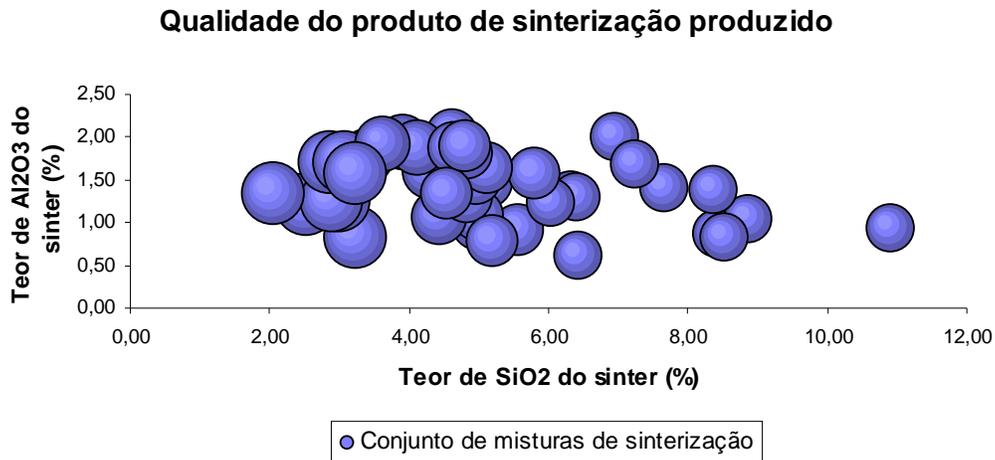


Figura 4.4: Gráfico da caracterização química do conjunto de misturas compostas

Percebe-se também grande diversidade na qualidade visada dos produtos das misturas compostas. Estão previstos produtos de sinterização com teores altos e baixos tanto para sílica quanto para alumina. A faixa de teor de sílica considerada varia de 2 a 11%, estando boa parte do domínio representada por uma das misturas. A basicidade das misturas é diretamente relacionada os teores de sílica de cada mistura e obedecem aos intervalos determinados na metodologia do trabalho. O mesmo ocorre com a alumina, sendo que a faixa considerada para este parâmetro varia de 0,5 a 2%. A relação da sílica e alumina também é bem diversificada, existindo misturas de alto teor de sílica com alumina tanto alta quanto baixa. Assim como também misturas de baixo e médio teor de sílica com as mais diferentes graduações de alumina.

Dessa forma também quimicamente pode-se considerar que o conjunto de misturas é bastante diversificado, atendendo a variabilidade visada no trabalho.

#### ***4.1.5 Seleção das misturas de sinterização***

A variabilidade granulométrica e química obtida para o conjunto de misturas de sinterização possibilita a avaliação de diferentes práticas operacionais presentes no mercado siderúrgico.

Devido a limitação de recursos de simulação física disponível para a realização do trabalho só foi possível contemplar no escopo do trabalho cinco misturas de sinterização e as respectivas práticas operacionais.

Considerando as limitações de escopo do trabalho e buscando avaliar a sensibilidade das metodologias de simulação física sob as mais diversas práticas operacionais propõe-se dividir o conjunto de misturas compostas por semelhança de suas propriedades física e química em grupos. O conjunto de misturas de sinterização e as respectivas práticas operacionais foram divididos em cinco grupos. Uma mistura de cada grupo foi selecionada para ser simulada perante o processo de sinterização, conforme o programa de ensaio contemplado neste trabalho. As misturas escolhidas foram identificadas por misturas A, B, C, D e E. As composições das misturas selecionadas encontram-se na tabela 4.2. A figura 4.5 destaca as cinco misturas dentre todo o conjunto de misturas. quanto suas características granulométricas. No eixo x encontramos a participação de partículas nucleantes e no eixo y do gráfico temos a participação de partículas. O tamanho da bola representa a quantidade de material fino presente nas amostras de minério, quanto maior a bola maior a quantidade de fino presente no minério.

### Caracterização granulométrica das misturas

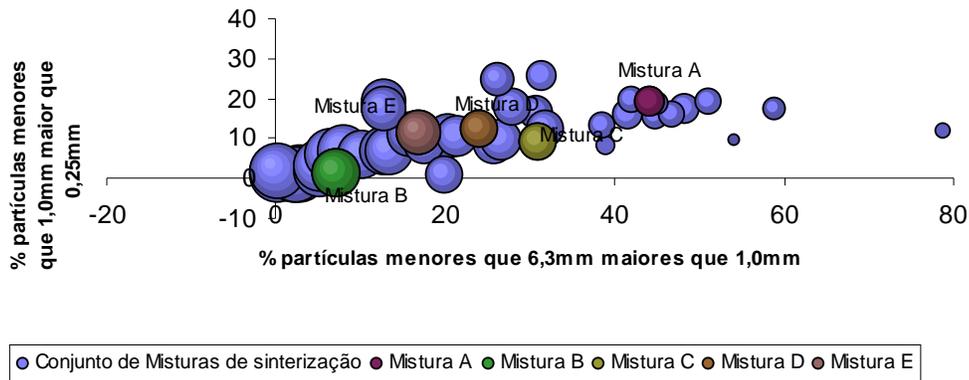
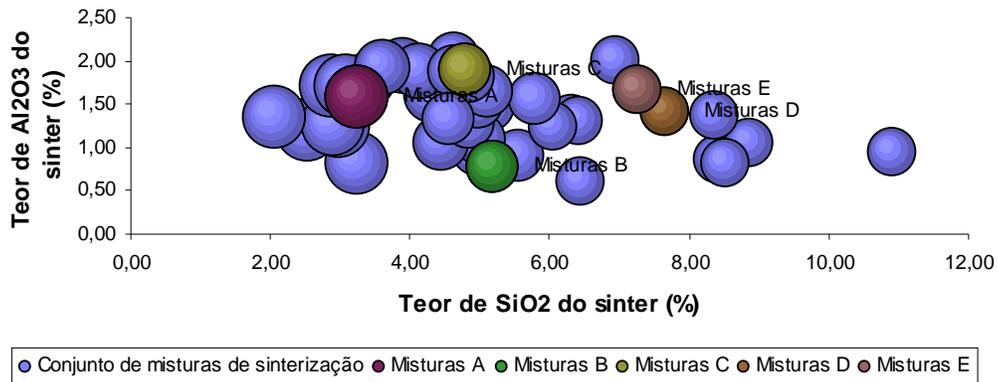


Figura 4.5: Gráfico da caracterização granulométrica das misturas selecionadas para a realização do programa de ensaio do trabalho.

Enquanto que a figura 4.6 destaca as qualidades química desejada dos sinters. A figura 4.6 mostra o gráfico apresenta no eixo x valores de sílica das misturas e no eixo y do gráfico os teores de alumina. O tamanho da bola representa a basicidade das misturas. As qualidades previstas dos produtos de sinterização de cada mistura encontram-se na tabela 9.3 presente no anexo 1.

### Qualidade do produto de sinterização produzido



Ref: ● Basicidade 1,9.

Figura 4.6: Caracterização química das misturas selecionadas para a realização do programa de ensaio do trabalho

Observando os gráficos percebe-se grande diversidade entre as misturas selecionadas e boa representatividade do domínio granulométrico e químico abordado pelo conjunto de misturas.

A mistura A representa o grupo de misturas cuja granulometria é mais grossa e o teor de sílica do sinter menor. Em relação a alumina esta mistura apresenta um teor médio visando representar o todo o grupo.

Já as misturas B e C representam um grupo de teor de sílica médio se diferenciando quanto granulometria e o teor de alumina. A mistura B é uma mistura bastante fina e de baixíssimo teor de alumina. O teor de alumina da mistura B é o menor dentre as misturas selecionadas. Enquanto que a mistura C já apresenta o maior teor de alumina das cinco misturas. Mas em relação à granulometria esta mistura possui grande quantidade de partículas grosseiras, sendo esta depois da mistura A a mais grossa das cinco.

Analisando granulométrica e quimicamente as misturas D e E são bastante semelhantes. Representam misturas finas com maior participação de partículas finas de alto teor de sílica e alumina. Apesar das semelhanças ambas representam grupos de misturas diferentes devido a variações nas propriedades e quantidades dos minérios que as constituem.

Tabela 4.2: Composição das misturas selecionadas para a realização do programa de ensaio do trabalho.

<i>Minério</i>	<i>Mistura A</i>	<i>Mistura B</i>	<i>Mistura C</i>	<i>Mistura D</i>	<i>Mistura E</i>
CHI1	0,00	13,85	0,00	0,00	10,7
CHI2	0,00	0,00	8,51	5,43	0,00
CHI3	2,78	0,00	0,00	0,00	0,00
CHI4	0,00	0,00	11,35	10,85	0,00
CHI5	0,00	0,00	0,00	10,85	0,00
CHI6	0,00	0,00	0,00	0,00	13,37
CHI7	0,00	0,00	0,00	5,43	13,37
CHI8	5,55	0,00	14,19	0,00	0,00
CHI9	0,00	0,00	0,00	0,00	16,05
AUS1	0,00	13,85	0,00	0,00	0,00
AUS2	0,00	0,00	5,68	0,00	0,00
AUS3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AUS4	0,00	16,62	0,00	0,00	0,00
AUS5	5,55	0,00	0,00	0,00	0,00
AUS6	0,00	0,00	17,03	0,00	0,00
IND1	0,00	0,00	0,00	10,85	0,00
IND2	8,33	0,00	0,00	0,00	0,00
AFR1	0,00	11,08	0,00	10,85	0,00
BRA1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BRA2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BRA3	22,76	0,00	0,00	0,00	0,00
BRA4	10,55	0,00	0,00	0,00	0,00
BRA5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

#### 4.1.6 Detalhamento da composição das misturas de sinterização selecionada.

##### *Caracterização da matriz de minérios que compõe as misturas*

Conhecer a matriz de minérios que compõe as misturas quanto à granulometria e/ou sua qualidade química auxilia o entendimento do comportamento e o desempenho das misturas perante o processo de sinterização. A matriz de minérios de cada uma das misturas foi identificada e estratificada a partir da classificação e agrupamento dos minérios participantes. A classificação dos minérios teve como base características físicas e químicas dos minérios.

Minérios chineses foram divididos em dois grupos. O primeiro identificado por *ComCHI* é composto por representantes que apresentam elevada quantidade de material fino (<0,25mm), acima de 95%. Estes minérios também são aqui denominados concentrados chineses. Nota-se grande diferença da participação de partículas finas na composição de sinter feeds australianos e brasileiros. Estes apresentam geralmente em torno de 20 a 30% de partículas com granulometria fina. O segundo grupo identificado por *SFCHI* contempla minérios chineses com menor presença de material fino quando comparado com representantes do grupo *ComCHI*. Minérios apresentam 53% de partículas menores que 0,25mm. Mas mesmo com a redução da participação de finos minérios do grupo *SFCHI* ainda apresentam elevada presença de finos quando comparados a sinter feeds brasileiros e australianos.

Os minérios australianos foram divididos em *AUS* e *AUS grosso*. O grupo classificados como *AUS* é composto por sinter feeds australianos típicos com 60 % de partículas intermediárias cuja granulometria é menor que 6,3mm e maior que 0,25mm. Em geral apresentam em torno de 20 a 30% de partículas com granulometria fina.

Já o grupo *AUS grosso* representa dos sinter feeds australianos que apresentam maior participação de partículas grossas em sua composição. Em média esses minérios apresentam 40% de partículas maiores que 6,3mm, e apenas 3% de partículas finas, menores que 0,25mm. Estes representantes são utilizados para engrossar misturas geralmente com elevada participação de minérios muito finos e viabilizar o processo de sinterização delas.

Os minérios brasileiros também foram divididos em dois grupos, mas não mais de acordo com características granulométricas, mas sim, pela diferença na qualidade química dos representantes abordados.

O grupo *BRA rico* é composto pelo minério brasileiro de elevado teor de ferro, em torno de 65%, e baixíssimo teor de sílica: 1,7%.

O grupo *BRA* é composto pelos demais representantes brasileiros em que a presença de sílica é maior e conseqüentemente o teor de ferro é menor. Eles apresentam em média teor de sílica em torno de 4% e de ferro em torno de 62%.

Os representantes indianos não foram divididos em grupos devido a proximidade granulométrica e química existente entre seus representantes.

Os minérios africanos são representados no trabalho apenas por um representante.

A figura 4.7 mostra a distribuição dos grupos de minérios na composição das misturas selecionadas.

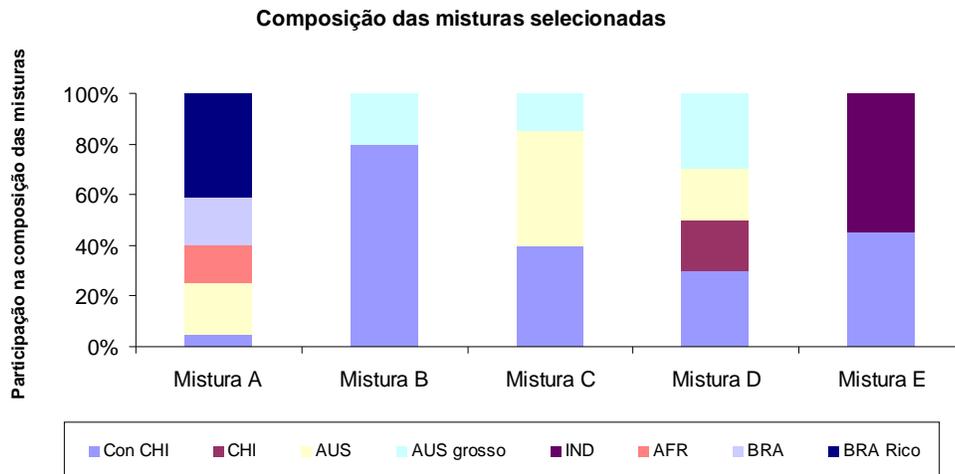


Figura 4.7: Gráfico da composição das misturas a partir da classificação dos minérios quanto suas propriedades químicas e físicas.

Pelo gráfico da figura 4.7 nota-se que a grande diversidade granulométrica e química já observada entre as misturas selecionadas para a simulação pode ser justificada pela variedade de minérios que compõe a matriz de minérios das misturas.

### *Caracterização granulométrica das misturas selecionadas*

Detalhando ainda mais a caracterização das misturas selecionadas foi feito um levantamento granulométrico das mesmas. Devido às diferenças nas propriedades físicas dos minérios e as diferentes participações destes na composição das misturas a distribuição granulométrica das misturas apresentam grande diversificação.

A figura 4.8 mostra o gráfico da distribuição granulométrica de cada uma das cinco misturas. Neste gráfico também se destaca a diversidade entre as misturas selecionadas. Há misturas com elevada participação de partículas finas até misturas bastante grosseiras. A presença de material nucleante e intermediário também é bastante distinto entre elas.

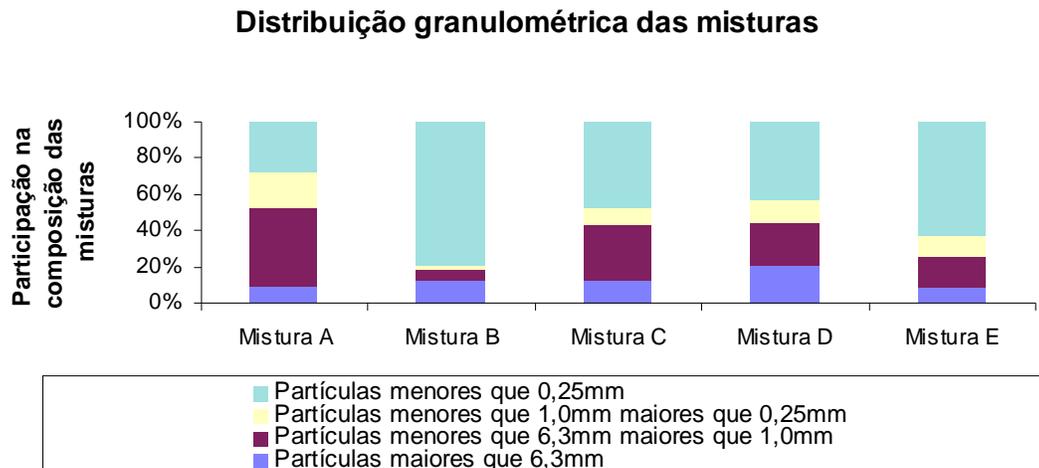


Figura 4.8: Gráfico da distribuição granulométrica das cinco misturas selecionadas para a realização das simulações físicas

Misturas com maior presença de partículas nucleantes e intermediária, como a mistura A, apresentam melhor sinterabilidade do que outras em que a presença destas partículas é reduzida seja pela predominância de partículas finas ou de partículas grossas. Esta tendência é observada, pois partículas nucleantes e intermediárias possibilitam a formação de grânulos favorecendo a permeabilidade do leito e consequentemente a produtividade do processo.

Misturas com elevada participação de partículas finas, como as misturas B e E tendem a apresentar dificuldade na formação de grânulos levando a deficiências no processo de sinterização. Para melhorar o desempenho da sinterização de misturas deste tipo é comum a prática de adição de cal à mistura, pois a adição deste fundente favorece a formação de grânulos neutralizando o efeito negativo da elevada presença de partículas finas.

O programa de ensaios deste trabalho prevê a manutenção da cal em 3% em todas as misturas. Esta restrição é importante para que o demérito da participação elevada de minérios de granulometria fina seja contabilizado na simulação física e não corrigida pela adição de cal.

### ***Especificação das misturas de sinterização selecionadas***

A partir do detalhamento das propriedades físico e químico dos minérios que compõe as misturas selecionadas e da determinação da qualidade esperadas para os produtos das queimas de cada uma das misturas foi possível caracterizar e descrever detalhadamente características físicas e químicas de cada uma das cinco misturas. A identificação das características de cada mistura permitirá esclarecer e justificar diferenças no comportamento das misturas frente ao processo de sinterização.

#### **➤ *Mistura A:***

A mistura A foi composta com minérios brasileiros, australianos, africanos e chineses, sendo predominante a presença de minério brasileiro. Os principais minérios que compõe a mistura são hematíticos e apresentam granulometria típicas de sinter feed

com maior concentração de material nucleante e de granulometria intermediária (em torno de 60%). A presença de material fino nestes materiais gira em torno de 30% e a faixa mais grossa gira em torno de 10%. Comparando as cinco misturas selecionadas para a realização dos ensaios físicos a mistura A devido a reduzida participação de concentrado magnetítico chinês é a mistura de menor participação de material de granulometria fina. Dos minérios que compõe a mistura apenas este minério apresenta granulometria bastante fina típica de concentrado os demais apresentam em torno de 20 a 35 % de material fino com exceção do minério australiano em que esta percentagem é mais reduzida (10%). As principais restrições de qualidade definidas na metodologia do trabalho, como as faixas de  $\text{SiO}_2$  e suas respectivas basicidades, o teor de MgO do sinter (1,5%), participação de cal nas misturas (3%) dentre outras descritas na metodologia do trabalho foram consideradas no cálculo do balanço de massa da mistura A. Pelo cálculo do balanço de massa o sinter resultante da queima desta mistura devido a elevada participação de sinter feed brasileiro de baixa sílica na mistura A apresentará uma sílica de aproximadamente 3,0%. De acordo com a relação de sílica e basicidade do sinter estabelecida para o programa de ensaios do trabalho a basicidade do sinter de baixa sílica deve ser 3,0. Conforme indicado no cálculo de balanço de massa o ajuste da basicidade será atingida pela adição de calcário calcítico à mistura. Para o ajuste do teor de MgO de 1,5% foi adicionado à mistura dolomita. Como consequência da dosagem dos minérios e fundentes obtem-se um teor de alumina de 1,7%.

➤ **Mistura B:**

A mistura B foi basicamente composta por concentrados magnetítico chineses sendo diferentemente da mistura A, uma mistura muito fina, com aproximadamente 80 % de material de granulometria fina. A grande participação de concentrados na mistura gera a necessidade da adição de minério de granulometria grossa para viabilizar a sinterização da mistura. Na mistura B este papel é feito pela adição de 16% de um sinter feed australiano de granulometria grossa. Esse material apresenta em torno de 60% de partículas grossas. A presença deste sinter feed eleva bastante a presença de material maior que 6,3 mm na mistura. Assim, mesmo a mistura B apresentando maior quantidade de finos do que a mistura A a faixa granulométrica de material grosso é quase 8% maior na mistura B. A maior participação de concentrados chineses além a de

afinar a mistura proporciona um teor de alumina visada no sinter bastante reduzido, menor que 1%. Já a sílica esperada nos produtos de sinterização desta mistura é de 5%. Este valor é obtido pela média dos teores de sílica dos minérios da mistura sem a necessidade de ajustes pela adição de fundentes como quartizito. Conforme as faixas de relação de sílica e basicidade a esperada na mistura A seria de 1,90. De acordo com o balanço de massa da mistura é necessário para se atingir esta basicidade a adição de calcário calcítico. Também para esta mistura o ajuste do teor de MgO foi feito pela adição de dolomita à mistura.

➤ **Mistura C:**

A mistura C foi composta por concentrados chineses e minérios australianos. Devido a presença de 30% de material concentrado, a mistura apresenta 50% de material fino em sua composição. Comparando com a mistura B a mistura apresenta menor quantidade de material fino. Esta diferença é devida a menor quantidade de concentrado chinês e a maior presença de sinter feeds australianos. Apesar da diferença granulométrica entre a mistura C e B, o balanço de massa de ambas as misturas prevê semelhança no teor de sílica prevista para o sinter, em torno de 5%. Conseqüentemente a dosagem de calcário calcítico e a basicidade resultante dos produtos formados são também bastante próximas. Também o ajuste do teor de MgO da mistura C é feito através da dosagem de dolomita. Devido à maior quantidade de minério australiano na mistura o teor de alumina desta mistura é mais elevado do que a mistura B, chegando aproximadamente a 2%.

➤ **Mistura D:**

A mistura D é também composta por minérios australianos e concentrados chineses. A mistura D é uma mistura de alta sílica, característica dos concentrados chineses selecionados. O teor de sílica previsto pelo balanço de massa para o sinter desta mistura é de 7,5%. Conseqüentemente o teor de ferro desta mistura é reduzido, em torno de 53%, quando comparado as outras misturas. Conforme as faixas de relação de sílica e basicidade assumidas no trabalho define-se para sinteres de alta sílica uma basicidade de 1,70. Para se atingir esta basicidade é necessária a adição de calcário calcítico. Para o

ajuste do teor de MgO de 1,5% foi adicionado à mistura dolomita. A presença de minérios australianos eleva a alumina da mistura, mas a presença de concentrados chineses de baixa alumina ajuda na redução do teor previsto para o sinter. O teor de alumina previsto para o sinter é um pouco menor que 1,5%. Dentre as cinco misturas do trabalho a mistura D apresenta a maior percentagem de material acima de 6,3 mm, em torno de 20% e baixa percentagem de material nucleante e intermediário. Isto se deve a maior participação de minérios australianos de granulometria mais grosseira na mistura D do que nas outras misturas. A participação deste tipo de minério nas misturas B,C é de aproximadamente 15% enquanto que na mistura D esta participação aumenta para aproximadamente 25%.

➤ **Mistura E:**

A mistura E é uma mistura bastante semelhante à mistura D sendo também uma mistura de elevado teor de sílica. O cálculo do balanço de massa também prevê para esta mistura sílica acima de 7,0%. Conseqüentemente o teor de ferro desta mistura também é reduzido e a basicidade compatível a faixa de sílica atingida é 1,70. A mistura além de concentrados chineses de alta sílica semelhantes aos selecionados para a composição da mistura D é composta por minérios indianos. Em termos granulométricos esta mistura se difere da mistura D, C e B pela não presença de minérios australianos de granulometria grossa. Outra diferença é a maior presença de material fino na mistura, em torno de 60% devido a maior presença de material com esta granulometria no minério indiano do que no australiano. Conforme as faixas de relação de sílica e basicidade assumidas no trabalho define-se para sinteres de alta sílica uma basicidade de 1,70. Para se atingir esta basicidade é necessária a adição de calcário calcítico. Nesta mistura também o teor alumina gira em torno de 1,5%. Mesmo com o teor de alumina dos minérios indianos sendo maior do que o dos australianos o teor de alumina da mistura E é semelhante ao teor da mistura D. Isto ocorre devido a combinação dos minérios selecionados para compor a mistura. Para o ajuste do teor de MgO de 1,5%, conforme definido para todas as misturas, foi adicionado à mistura dolomita.

## 4.2 Programação de ensaios – Otimização da simulação física

A programação de ensaios do trabalho contempla a realização de simulação física das cinco misturas de sinterização selecionadas tanto perante os procedimentos da metodologia do sinter pot test quanto perante os procedimentos da metodologia do mini pot test.

Devido à diversidade de propriedades física e química existente entre as misturas selecionadas será possível avaliar a sensibilidade das metodologias perante variações na composição das misturas e perante variações em parâmetros de processo. Dessa forma a correlação obtida entre as metodologias representará um horizonte bastante diversificado de operações.

A validação de cada metodologia contempla a realização de uma sequência de simulações físicas visando à otimização das queimas através de alguns ajustes dos parâmetros de processo.

A sequência de simulações físicas de otimização inicia-se com a queima da mistura para a geração de finos de retorno. Objetiva-se a geração de 30% finos.

A mistura é composta conforme o cálculo do balanço de massa de acordo com a definição de volumes de minérios, fundentes, e combustíveis considerando os 30% de finos de retorno, 4% de dosagem de combustível e 7% de umidade.

Avalia-se a quantidade de finos gerada nesta primeira queima. Em posse dos resultados de como a mistura reagiu à sinterização e a formação de finos altera-se a participação de combustível na mistura.

Caso a quantidade de finos gerados seja maior do que a inicialmente especificada (30%) a fim de se aumentar a resistência do produto formado aumenta-se a quantidade de combustível da mistura. Caso a quantidade de finos gerados for menor do que a inicialmente especificada (30%) a fim de se diminuir a resistência do produto formado deve-se diminuir a quantidade de combustível da mistura.

Após o ajuste de combustível da mistura são realizadas queimas para a definição da umidade ótima.

A primeira simulação física executada considerou as condições definidas no fechamento do balanço de massa. Em seguida foi realizada uma sequência de simulações físicas para a obtenção da umidade ótima de cada mistura. O ajuste da umidade foi obtido pela relação da produtividade com a umidade de cada mistura. Ou seja, para uma mesma mistura, na sinterização a produtividade do processo aumenta com o aumento da umidade da mistura. Assim a otimização das condições de queima corresponde à umidade que permite a máxima produtividade.

Apesar da produtividade da sinterização ser favorecida pelo aumento da umidade da mistura o excesso de umidade na mistura acaba por provocar efeitos negativos na produtividade da sinterização. Para se garantir a condição de queima cuja produtividade seja máxima foram realizados ensaios aumentando progressivamente a umidade da mistura até a obtenção da inflexão do efeito da umidade. Ou seja, a queima em que há a redução da produtividade devido ao excesso de adição de água. Após se encontrar a umidade ótima reajusta-se o nível de coque da mistura a fim de se manter a geração de finos balanceado (30%).

As condições de queima que definem o ponto de inflexão de produtividade (máxima produtividade), com umidade e combustível devidamente ajustados, deve ser repetida para se ter uma duplicata do ensaio e se avalie a repetibilidade das metodologias de simulação avaliadas.

Os parâmetros obtidos das queimas finais de cada mistura assim como os produtos produzidos são as principais respostas deste trabalho. Os objetivos deste trabalho serão cobertos a partir da avaliação dos resultados de simulações destas queimas.

### **4.3 .Metodologias de Simulação física**

Os procedimentos das metodologias de simulação física são bastante similares. Tanto para a metodologia do mini pot test quanto para a metodologia do sinter pot test as principais etapas do procedimento adotado para a realização dos ensaios são:

- Pesagem dos materiais;
- Mistura dos minérios e fudentes/aditivos;

- Adição e hidratação da cal;
- Adição de água;
- Granulação a frio em tambor rotatório;
- Carregamento da mistura no pot;
- Sinterização;
- Resfriamento;
- Caracterização do sínter;

#### ***4.3.1 Produção de finos de retorno***

As duas metodologias abordadas consideram a adição de finos de retorno às misturas de sinterização. A queima realizada para a geração de finos o produto produzido será britado e peneirado a 1mm, 3mm e 5 mm. As três frações de cada produto serão proporcionalmente adicionadas a respectiva mistura de sinterização para a realização das demais queimas.

#### ***4.3.2 Mistura e granulação***

O processo de homogeneização e granulação da mistura de sinterização é bastante semelhante para ambas as metodologias de simulação física. Inicialmente calcula-se a quantidade de cada componente da mistura (sinter feeds, finos de retorno, aditivos, fundentes e combustível) através do balanço de massa. Em seguida o material é pesado e a umidade dos componentes da mistura determinada.

O processo de homogeneização se inicia através de uma homogeneização manual. A segunda etapa contempla a mistura do material com água estequiometricamente a reação de hidratação da cal presente na mistura. O restante da água a ser adicionada na mistura será acrescentado nos tambores rotativos de forma uniforme.

Cada metodologia utiliza um tambor rotativo específico. O tambor dimensionado para a metodologia do mini pot test possui 250 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento, enquanto que o tambor da metodologia do sinter pot test possui 600 mm de diâmetro e 1400 mm de comprimento.

A rotação dos tambores é ajustada a 35 rpm nas duas metodologias. A duração total do processo de mistura é de 11 minutos, também ocorrendo em etapas.

Nos primeiros dois minutos o processo de mistura nos tambores rotativos ocorre sem a adição de água. Em seguida a quantidade de água requerida para se atingir a umidade ótima da mistura é pulverizada na mistura através de um tubo interno ao tambor rotativo. A adição de água no tambor rotativo ocorre por dois minutos com velocidade de rotação também ajustada a 35 rpm.

O cálculo da quantidade de água a ser adicionado no tambor rotativo considera o valor da umidade inicial característica dos minérios e o valor da umidade ótima a ser atingida, previamente definida pelo balanço de massa.

Durante os 7 minutos finais a velocidade do tambor é reduzida a 15 rpm. Neste período o movimento de rotação das partículas possibilita o crescimento dos grânulos.

Após a granulação a umidade e a permeabilidade dos grãos foi determinada. Há uma diferença entre os métodos de determinação da permeabilidade das metodologias de simulação física.

A determinação da permeabilidade do leito da metodologia do mini pot test ocorre no próprio mini pot. Após o carregamento do pot incluindo 15 mm de camada de forramento uma bomba de sucção é acoplada no topo do pot. Quando a bomba é acionada fluxo de ar passa por todo o leito. O fluxo é ajustado a 300L/min. A queda de pressão registrada ao longo da passagem do leito é registrada pelo manômetro. Através da relação da queda de pressão e permeabilidade dada pela equação de Voice (SS) a permeabilidade foi calculada. Baixa pressão indica alta permeabilidade.

A determinação da permeabilidade do leito da metodologia do sinter pot test ocorre em um equipamento específico em formato cilíndrico com 150mm de diâmetro e 500 mm de altura. Após o carregamento do pot incluindo 15 mm de camada de forramento uma bomba de sucção é acoplada no topo do pot. Quando a bomba é acionada fluxo de ar

passa por todo o leito. O fluxo é ajustado a 300L/min. A queda de pressão registrada ao longo da passagem do leito é registrada pelo manômetro. Através da relação da queda de pressão e permeabilidade dada pela equação de Voice (4.1) a permeabilidade foi calculada. Baixa pressão indica alta permeabilidade.

Voice formula:

$$\square \quad KD = (Q/A) \times (h/\Delta P) \quad n \quad (4.2)$$

Onde, KD—Índice de permeabilidade;

Q—fluxo de ar, m<sup>3</sup>/min.

A—secção de área, m<sup>2</sup>.

h—altura da camada, mm.

$\Delta P$ —variação de pressão, Pa.

n—constant, normalmente 0.6.

A permeabilidade é calculada em função da variação da pressão ao longo do leito, mantendo os demais parâmetros constantes.

### 4.3.3 Sinterização

A etapa de sinterização consiste na queima das misturas de sinterização. O equipamento em que é realizada a queima é denominado pote. Cada uma das metodologias consideradas apresenta dimensionamento diferente deste equipamento.

Nesta etapa a mistura granulada é despejada no pote. Inicialmente a camada inferior do pote será preenchida com a camada de forramento. A altura da camada de forramento varia de acordo com a metodologia de simulação e será especificada no detalhamento de cada metodologia.

Independentemente da metodologia abordada, o carregamento da mistura em cada um dos potes ocorre até que todo o volume do pote seja preenchido por mistura. A altura de mistura carregada no pote coincide paralelamente com o topo do pote

Após o carregamento do pote o sistema de exaustão de ar é ligado e inicia-se a sucção de ar do topo do pote. O processo de sinterização se inicia quando o queimador é posicionado na superfície da camada a ser sinterizada e uma chama é posta em contato com a mistura. Neste momento inicia-se a queima dos combustíveis desencadeando a sinterização da mistura. O ar em movimento descendente provoca o deslocamento da frente de queima até o nível inferior do pot. Em ambas as metodologias o tempo de sinterização será medido a partir do início do ciclo da ignição até o momento que a temperatura do gás de sucção atinge seu valor máximo. Assim, a queda da temperatura do ar succionado indica o fim da sinterização e o início do resfriamento do sinter. O ensaio termina após cinco minutos de tendência de queda da temperatura do ar succionado.

#### ***4.3.4 Metodologia Mini-pot tests***

O equipamento de queima (pote) dimensionado para a metodologia do mini pot test foi dimensionado pela equipe de pesquisa e desenvolvimento da universidade Central South University (CSU) localizada na cidade de Shangsha na provincia de Hunan na China. O pote feito de XXXX apresenta um design cilíndrico com 500mm de altura e 100mm de diametro. A figura 4.1 detalha a secção do cilindro do pote dimensionado para a metodologia do mini pot test.

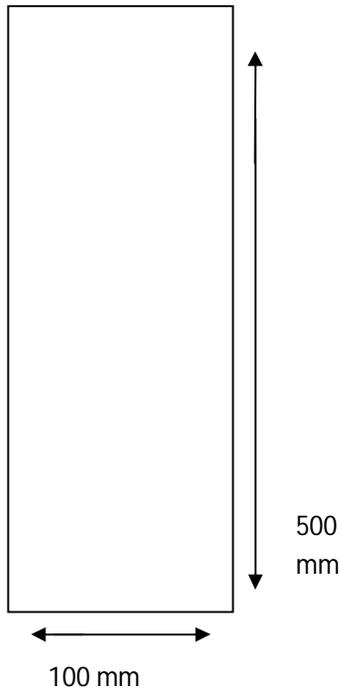


Figura 4.9: Dimensionamento do equipamento de queima da metodologia mini pot test

O equipamento especificado para a metodologia do mini pot test consome por queima aproximadamente 10 kg (base seca) de mistura de sinterização. Durante a simulação alguns parâmetros operacionais são mantidos constantes como: altura da camada de sinterização, pressão de sucção de ar, temperatura e tempo de ignição.

Os principais parâmetros de processos definidos para as queimas da metodologia do mini pot test são:

- Altura de camada (total): 500 mm
- Camada de forramento: 15 mm (500g, 10x15 mm sinter)
- Temperatura de ignição: 1000°C
- Tempo de ignição: 90 seconds
- Ignição de sucção: 400 mm H<sub>2</sub>O

- Pressão de sucção: 800 mm H<sub>2</sub>O
- Tempo de resfriamento: 300 segundos a 500 mm H<sub>2</sub>O
- Finos de retorno: 30%

#### 4.3.5 Metodologia Sinter Pot tests

O equipamento de queima (pote) dimensionado para a metodologia do sinter pot test foi dimensionado pela equipe de pesquisa e desenvolvimento da universidade Central South University (CSU) localizada na cidade de Shangsha na provincia de Hunan na China. O pote feito de XXXX apresenta um design cônico. A figura 4.2 mostra as dimensões da secção cônica do pote dimensionada para a metodologia do sinter pot test.

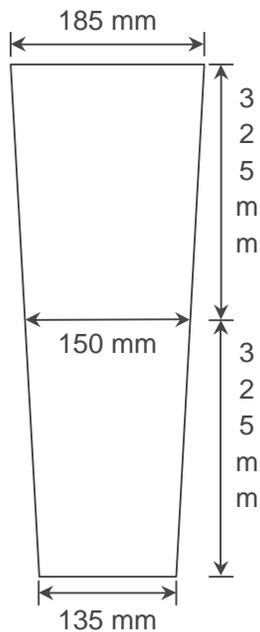


Figura 4.10: Dimensionamento do equipamento de queima da metodologia sinter pot test

Para as dimensões propostas pela metodologia do pot test cada queima consome 30 Kg (base seca) de mistura de sinterização.

Durante a simulação alguns parâmetros operacionais são mantidos constantes: altura da camada de sinterização, pressão de sucção de ar, temperatura e tempo de ignição.

Na metodologia do sinter pot test a camada de forramento é formada com 1,0 kg de material de granulometria um pouco mais grossa do que o considerada na metodologia do sinter pot test.

Os principais parâmetros de processos definidos para as queimas da metodologia do sinter pot test são:

- Altura de camada (total): 650-900 mm (Max 1000 mm)
- Camada de forramento: 20 mm (1000g, 15x20 mm sinter)
- Temperatura de ignição: 1000°C
- Tempo de ignição: 90 segundos
- Ignição de sucção: 500 mm H<sub>2</sub>O
- Pressão de sucção: 1000 mm H<sub>2</sub>O
- Tempo de resfriamento: 300 seconds com 500 mm H<sub>2</sub>O
- Finos de retorno: 30%

#### **4.4 Variáveis de processo monitoradas nas simulações**

As metodologias avaliam o desempenho das simulações ensaio através do monitoramento de algumas variáveis de processo. Ambas as metodologias consideram e monitoram as mesmas variáveis de processo. Os métodos de obtenção e determinação das variáveis de processo consideradas foram baseados em normas internacionais, mas alguns métodos sofreram adaptações para a adequação a equipamentos e condições durante a realização dos ensaios. Abaixo encontram-se descritos os principais métodos de obtenção das variáveis de processo conforme foi realizado neste programa de trabalho.

- Distribuição granulométrica de minérios;

A determinação da distribuição granulométrica utiliza métodos de peneiramento a seco e a úmido. Pesa-se 200 gramas de amostras de cada minério para cada peneiramento. Amostras grossas são peneiradas a seco em peneiras vibratórias por 8 minutos. Já amostras com elevada participação de finos são primeiramente peneiradas a úmido a 0.15 mm ou 0.074 mm. Cada fração retida nas peneiras é pesada e caracterizada quimicamente.

- Distribuição granulométrica dos grânulos da mistura de sinterização;

O procedimento de determinação da resistência dos grânulos crus formados em função de impactos e forças de compressão presentes durante processos de carregamento considera a queda livre de 2 kg de mistura granulada em 1 metro de altura em um prato de aço com 0.5 mm de espessura. Após dez quedas mede-se a percentagem da fração passante em 0,5mm. A comparação da percentagem de minério passante em 0,5mm é usada para determinar a resistência dos grânulos.

- Tamanho médio e resistência dos grânulos de mistura;

A mistura granulada é peneirada a -0.5, 1, 3 e 5 mm, o conteúdo com granulometria entre 1~5 mm fraction é utilizada como índice para avaliar o efeito de granulação.

- Temperatura do gás na caixa de vento;

Parâmetro medido.

- Velocidade de chama da sinterização;

Velocidade de chama da sinterização é definida como:  $V^{\perp}$

$$\blacksquare V^{\perp} = H/t \text{ mm/min} \quad (4.3)$$

Onde, H—altura da camada de sinter em milímetros.

t—tempo de sinterização em minutos.

➤ Produtividade da sinterização;

Produtividade da sinterização é definido como r:

$$\blacksquare r = 7.65 \times 10^4 M / D^2 \cdot t \text{ t/m}^2 \cdot \text{h} \quad (4.4)$$

Onde, M—massa de sinter produto, Kg.

D—diâmetro do sinter pot, mm.

t—tempo de sinterização em minutos.

➤ Rendimento de sinter;

Rendimento da sinterização é definido como P:

$$\blacksquare P = (S_0 - R) / S_0 \times 100\% \quad (4.5)$$

Onde, S<sub>0</sub>—massa de bolo de sinter, Kg.

R—massa de finos de retorno, Kg.

- Consumo de combustível;

Consumo de combustível é definido como EC:

$$\blacksquare EC = (m_0 - m) \times (1 - W\%) \times C\% / M_2 \times 10^3 \text{ kg/t-s} \quad (4.6)$$

Onde,  $m_0$ —massa de mistura granulada, Kg.

$m$ — massa de mistura após o carregamento do pot, Kg.

$W$ —umidade da mistura granulada, %.

$C$ —fração do combustível sólido nas misturas de sinterização, %.

$M_2$ —massa de produto sinter, Kg.

- Índice de tamboramento;

O índice de tamboramento, que avalia a resistência do sinter, é calculado pela formula (4.6);

$$\blacksquare TI = m'_{10} / m'_{100} \times 100\% \quad (4.7)$$

Onde,  $m'_{10}$ —massa em Kg de partículas maiores que 5 mm e 6.3mm respectivamente para a metodologia do mini pot test e para a metodologia do sinter pot test.

$m'_{100}$ —massa total; 1,5 kg e 15 kg respectivamente para a metodologia do mini pot test e para a metodologia do sinter pot test.

As metodologias de cálculo e obtenção das variáveis de processos das simulações físicas e de qualidade dos produtos produzidos são bastante semelhante tanto para as simulações da metodologia do mini pot test quanto para a metodologia do sinter pot test.

#### ***4.4.1 Caracterização do sinter***

O sinter de cada mistura obtido nas simulações será caracterizado, química, metalúrgica e fisicamente.

Após ser retirada do pote a massa produzida é resfriada e pesada. Em seguida passa por um processo de desagregação gerando o sinter produto. A massa é submetida a uma queda de 2m de altura por quatro vezes seguidas. As partículas maiores que 40mm remanescente serão britadas para diminuição de seu tamanho. Após a britagem toda a massa será peneirada a 40, 25, 16, 10 e 5mm e as massas obtidas em cada fração granulométrica serão quantificadas. Partículas maiores que 5mm constituirão o sinter.

A caracterização física do sinter ainda engloba a determinação da resistência do produto através da realização do ensaio de tamboramento. O cálculo do índice de tamboramento é feito através da utilização da equação (4.7).

#### ***Determinação do índice de tamboramento - Metodologia do metodologia do mini pot test:***

Para a determinação do índice de tamboramento (IT) do sinter resultante de cada mistura foi composta uma amostra de 1,5kg com as seguintes frações de sinter: -40+25 mm, -25+16 mm and -16+10 mm. Realizam-se os ensaios de determinação do índice de tamboramento dos produtos de sinterização no tambor de granulação da metodologia do mini pot test. Este tambor possui um décimo do volume e o mesmo diâmetro do tambor especificado na ISO3271. A velocidade de rotação e o número de rotações estabelecidas no procedimento de determinação do índice de tamboramento também são semelhantes às definidas na ISO3271.

A principal diferença entre a metodologia de determinação do índice de tamboramento contemplada na metodologia de simulação física do mini pot test é a granulometria de

determinação de resistência do sinter. Na metodologia do mini pot o índice de tamboramento é determinado em função das partículas IT% (+5 mm) enquanto que na metodologia de determinação de índice de tamboramento da ISO3271 o índice é determinado em função das partículas IT% (+6.3 mm).

***Determinação do índice de tamboramento - Metodologia do metodologia do sinter pot test:***

Para a determinação do índice de tamboramento (IT) do sinter resultante de cada mistura foi composta uma amostra de 15kg com as seguintes frações de sinter: -40+25 mm, -25+16 mm and -16+10 mm. Realizam-se os ensaios de determinação do índice de tamboramento dos produtos de sinterização no tambor de granulação da metodologia do sinter pot test conforme a ISO3271. O índice é determinado em função das partículas IT% (+6.3 mm).

#### **4.5 Desenvolvimento do modelo matemático correlacional**

A análise dos parâmetros de processo e das características físicas do sinter obtidos a partir das simulações físicas levará ao desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de correlacionar as metodologias de simulação física abordadas: mini pot test e sinter pot test.

As correlações entre parâmetros das metodologias serão obtidas através do método estatístico de regressão linear. A ferramenta utilizada para a aplicação da regressão linear foi o Microsoft Office Excel 2003.

“Em estatística ou econometria, regressão linear é um método para se estimar a condicional (valor esperado) de uma variável  $y$ , dados os valores de algumas outras variáveis  $x$ . A regressão, em geral, trata da questão de se estimar um valor condicional esperado. A regressão linear é chamada "linear" porque se considera que a relação da resposta às variáveis é uma função linear de alguns parâmetros.”<sup>(14)</sup>

## **5 Resultados e Discussões**

O programa de ensaio do trabalho foi realizado para as cinco misturas selecionadas. Simulações físicas seguindo as diretrizes tanto da metodologia do mini pot test quanto da metodologia do sinter pot test foram realizadas. Os parâmetros de processo das queimas realizadas foram coletados e os produtos de cada queima analisados.

Análises dos resultados das simulações físicas foram analisados para a avaliação da metodologia de simulação física de pequena escala denominada mini pot test e comparação entre as metodologias de simulação abordadas.

### **5.1 Metodologias de simulação física: Mini pot test VS sinter pot test**

As duas metodologias de simulação física avaliadas neste trabalho se diferem principalmente pelo dimensionamento de seus equipamentos. Além da diferença existente nos tambores rotativos utilizados em cada metodologia destaca-se a diferença no dimensionamento dos equipamentos onde ocorre a queima das misturas de sinterização, ou seja, diferença de dimensionamento do pote. A metodologia sinter pot test utiliza um pote cuja capacidade de mistura de sinterização gira em torno de 30 kg enquanto que a metodologia do mini pot test considera um pote com capacidade de 7 kg de amostra.

Para a avaliação das metodologias de simulação física foram previstas a realização de simulações físicas seguindo tanto a metodologia do sinter pot test quanto a metodologia do mini pot test. Amostras das cinco misturas de sinterização selecionadas no trabalho foram compostas para a realização de queimas sob as diretrizes e dimensionamentos de ambas as metodologias consideradas, conforme descrito na metodologia do trabalho. A simulação válida de cada mistura é obtida após a realização de uma sequência de simulações para o ajuste de variáveis. O valor das variáveis considerado para análise das metodologias de simulação foi obtido pela média dos valores obtidos a partir das simulações válidas de cada mistura e dos valores obtidos na realização de um ensaio duplicata da simulação válida.

A composição das amostras das cinco misturas utilizadas para a realização de cada um dos ensaios programados para a obtenção das respostas do trabalho obedeceu à participação dos componentes das misturas determinadas no cálculo do balanço de massa de cada uma delas. Minérios, combustíveis, aditivos e fundentes que compõem as misturas foram pesados de acordo com as participações definidas nos balanços de massa iniciando assim a preparação das misturas para as queimas. A tabela 9.5 do anexo 1 mostra as participações em massa de cada componente das misturas.

### ***5.1.1 Mistura e granulação***

Seguindo os procedimentos de preparação das misturas descritos na metodologia do trabalho, após a pesagem dos componentes as amostras a serem simuladas foram submetidas à etapa de mistura e granulação

Inicialmente ocorreu a homogeneização manual dos componentes de cada mistura. Após a homogeneização dos componentes foi adicionado água às misturas. Em uma primeira etapa a água foi adicionada estequiometricamente à quantidade de cal presente na mistura visando a hidratação deste componente. O restante da água foi adicionado no tambor rotativo até a umidade ótima de cada mistura ter sido atingida. À medida que a água foi adicionada no tambor rotativo ocorreu aglomeração das partículas das misturas levando a formação de grânulos. Estes podem ser denominados grânulos verdes por ainda não ter passado pelo processo de queima da sinterização.

Apesar da semelhança entre os procedimentos da etapa de mistura e granulação de ambas as metodologias abordadas, os tambores rotativos considerados em cada metodologia apresentam dimensionamentos distintos. Esta diferença no dimensionamento dos tambores rotativos afeta diretamente a formação dos grânulos verdes. Sendo possível destacar e comparar variações na distribuição granulométrica dos grânulos formados nos tambores rotativos típicos da metodologia do sinter pot test e os grânulos formados nos tambores dimensionados de acordo com a metodologia do mini pot test.

As curvas de distribuição granulométrica dos grânulos verdes obtidos pela aglomeração das cinco misturas consideradas para a avaliação e comparação das duas metodologias

de simulação propostas são mostradas nos gráficos das figuras 5.1 e 5.2. Ambos os gráficos mostram a porcentagem de partículas passante em cada uma das aberturas da malha granulométrica escolhida. O gráfico 5.1 mostra a distribuição granulométrica dos grânulos das cinco misturas de sinterização formados de acordo com a metodologia do mini pot test. Enquanto que o gráfico 5.2 mostra a distribuição granulométrica dos grânulos das cinco misturas de sinterização formados de acordo com a metodologia do pot test.

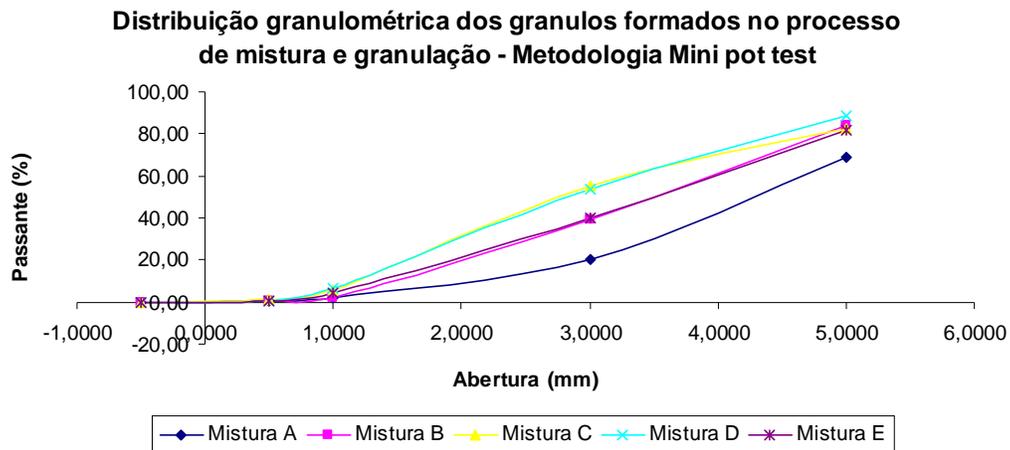


Figura 5.1: Gráfico da distribuição granulométrica dos grânulos verdes formados de acordo com a metodologia do mini pot test.

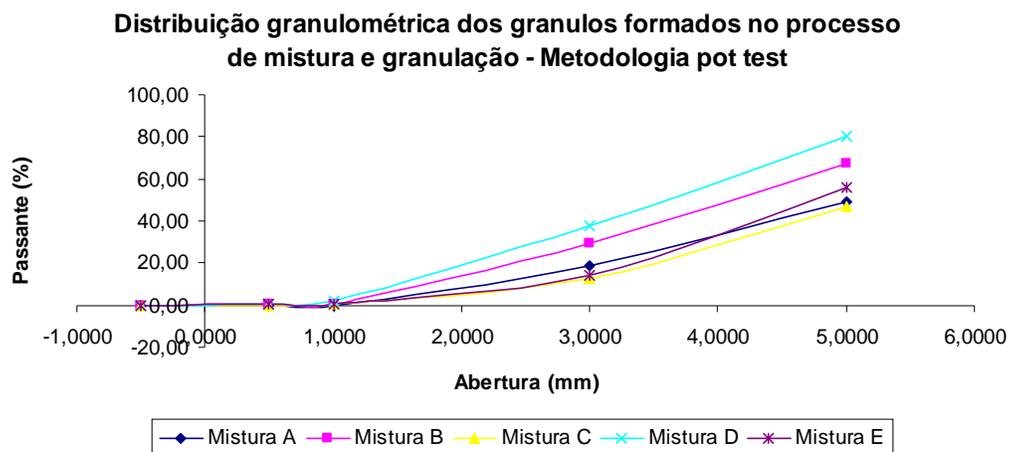


Figura 5.2: Gráfico da distribuição granulométrica dos grânulos verdes formados de acordo com a metodologia do pot test.

Nota-se que as amostras da mistura A preparadas tanto para a simulação sob as diretrizes da metodologia do mini pot test quanto para a simulação da metodologia do sinter pot test apresentam maior facilidade de formação de grânulos e como consequência grânulos formados são mais grossos do que as outras misturas.

Considerando a metodologia do sinter pot test a mistura A apresenta 45 % de partículas passante na abertura de 5mm enquanto que a percentagem de passante em 5 mm das demais misturas é maior que 65%. Já Considerando a metodologia do mini pot test a mistura A apresenta apenas 68 % de partículas passante na abertura de 5mm enquanto que a percentagem de passante em 5 mm das demais misturas é de 80%.

Conforme os gráficos 4.5 e 4.8 a mistura A é uma mistura que apresenta a maior presença de partículas intermediárias e nucleantes, em torno de 70%. A mistura C, a segunda com maior participação destas partículas, possui apenas aproximadamente 40. Estas características granulométricas favorecem a aglomeração da mistura A aumentando a quantidade e o tamanho dos grânulos formados comparada às demais misturas.

O comportamento de formação de grânulo da mistura D também é semelhante em ambas as metodologias. Esta mistura apresenta os menores grânulos formados dentre as cinco misturas. Esta mistura apresenta elevada participação de minério classificado como *AUS grosso*. Este grupo de minérios possui elevada participação de partículas grossas (maiores que 6,3mm). A presença de partículas nucleantes e intermediárias nesta mistura não é baixa, em torno de 30 %. Mas mesmo a presença destas partículas foram suficientes para neutralizar o demérito das partículas grossas.

As misturas B e E também apresentam comportamento semelhante perante as duas metodologias de simulação física.

A mistura B em ambas as metodologias foi identificada como a segunda mistura mais fina. A principal característica desta mistura é a elevada participação de concentrado chinês e a presença de partículas finas em torno de 80%. A baixa granulometria dos grânulos formados é justificada pela interferência negativa de partículas menores que 0,25 mm na formação de grânulos. Comparando as misturas B e D concluiu-se que a presença tanto de partículas grossas quanto partículas finas são prejudiciais a formação

dos grânulos, mas pelos resultados percebe-se que o demérito da predominância de partículas grossas é maior.

A mistura E é composta por concentrados chineses de alta sílica semelhantes aos selecionados para a composição da mistura D e por minérios indianos. Em termos granulométricos esta mistura se difere da mistura D, C e B pela não presença de minérios australianos de granulometria grossa. Outra diferença é a maior presença de material fino na mistura, em torno de 60% devido a maior presença de material com esta granulometria no minério indiano do que no australiano. Esta mistura apresenta maior tendência a formação de grânulos que B devido a maior presença de partículas intermediárias e nucleantes favoráveis a formação de grânulos.

A mistura C foi a mistura que apresentou maior desvio entre as duas metodologias consideradas. Nos ensaios da metodologia do mini pot test a mistura C formou grânulos de granulometria grossa mas quando foi submetido à metodologia do sinter pot test os grânulos formados foram os menores dentre as misturas. A instabilidade desta mistura perante as duas metodologias por ser explicada pela distribuição mais igualitária das frações granulométrica desta mistura.

Comparando o comportamento de uma mesma mistura perante cada uma das metodologias observa-se diferença na distribuição granulométrica dos grânulos verdes. A figura 5.3 mostra o gráfico da correlação da percentagem de grânulos verdes menores que 5 mm das cinco misturas formados seguindo os procedimentos tanto da etapa de mistura e granulação da metodologia do mini pot test quanto da metodologia do sinter pot test.

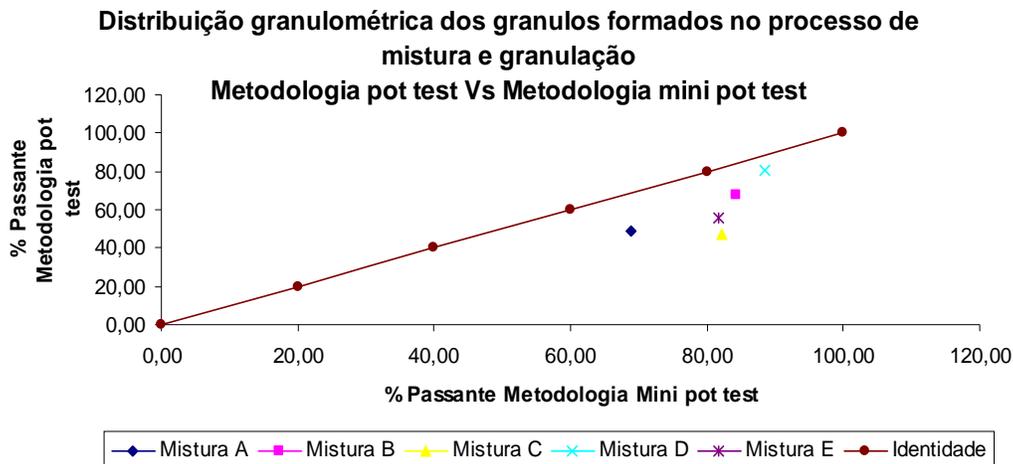


Figura 5.3: Gráfico da comparação da percentagem passante de grânulos verdes menores que 5 mm formados pela aplicação da metodologia do mini pot test e a percentagem formada pela aplicação da metodologia do pot test.

A partir destes dados observa-se que a metodologia do sinter pot test apresenta uma tendência mais favorável a aglomeração das partículas e a conseqüente formação dos grânulos. De acordo com os procedimentos estabelecidos para as duas metodologias de simulação física tanto a velocidade de rotação quanto o tempo de residência das misturas nos tambores rotativos de ambas as metodologias são os mesmos. Assim a maior facilidade de formação de grânulos observada na metodologia do sinter pot test é atribuída à maior área de rolagem do tambor dimensionado para esta metodologia. A maior área de rolagem e o maior tempo em contato com da mistura favorece a aglomeração das partículas e o crescimento dos grânulos.

### 5.1.2 Sinterização

Após as etapas de pesagem, de composição, de homogeneização e de granulação das misturas inicia-se o processo de queima nos potes. Assim como nas outras etapas cada uma das cinco misturas foi simulada seguindo os procedimentos determinados nas duas metodologias de simulação de sinterização propostas no trabalho.

Nesta etapa a diferença entre as metodologias é o dimensionamento do pote. Nesta etapa ocorre efetivamente o processo de sinterização, variações no equipamento interferem diretamente em parâmetros do processo e na qualidade do sinter.

### *Carregamento*

De acordo com o programa de ensaios descrito na metodologia do trabalho o carregamento dos potes ocorre até que a altura da carga coincida com a borda do equipamento. Para cada uma das queimas de misturas da metodologia do sinter pot test foi consumido aproximadamente 30 kg de mistura de sinterização para o carregamento do pote. Já para as queimas realizadas sob as diretrizes do mini pot test foi consumido em torno de apenas 7 kg material.

O consumo de minérios na realização de simulações físicas sob as diretrizes da metodologia do mini pot test é cerca de 15% da massa de minério consumida nos ensaios considerando a metodologia do sinter pot test.

Essa redução de massa de minério apresenta-se como uma grande vantagem da aplicação da metodologia do mini pot test, pois permite ampliação do mapeamento do comportamento da sinterização perante à variações na mistura de sinterização.

A figura 5.4 mostra o gráfico da quantidade média de material das cinco misturas de sinterização consumida nas simulações realizadas para a validação das metodologias de simulação física. O carregamento do pote da metodologia do pot test consumiu em média 25,7 kg da mistura D enquanto que a quantidade de massa no pote da queima da mistura B chegou a 28 kg de material.

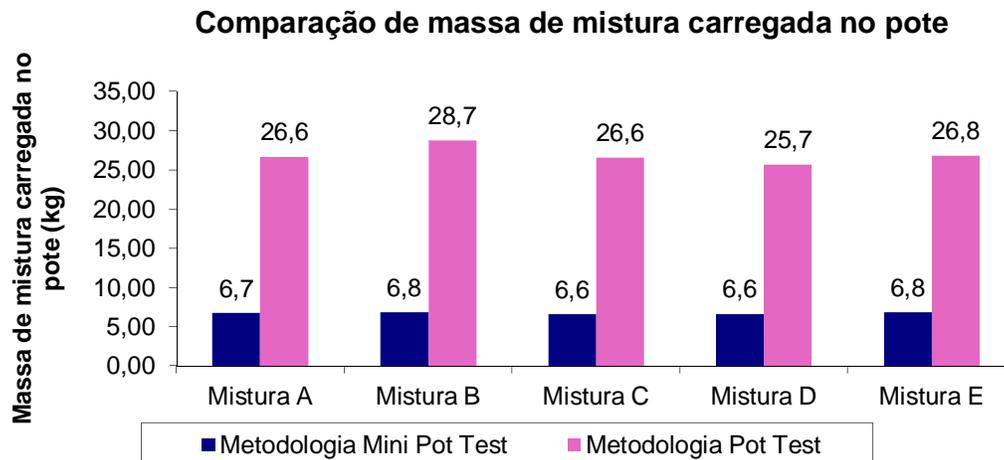


Figura 5.4: Gráfico da comparação entre a massa de mistura carregada no pote da metodologia do sinter pot test com a massa de mistura carregada no pote da metodologia do mini pot test.

A figura 5.5 mostra o gráfico das densidades das misturas carregadas no pote.

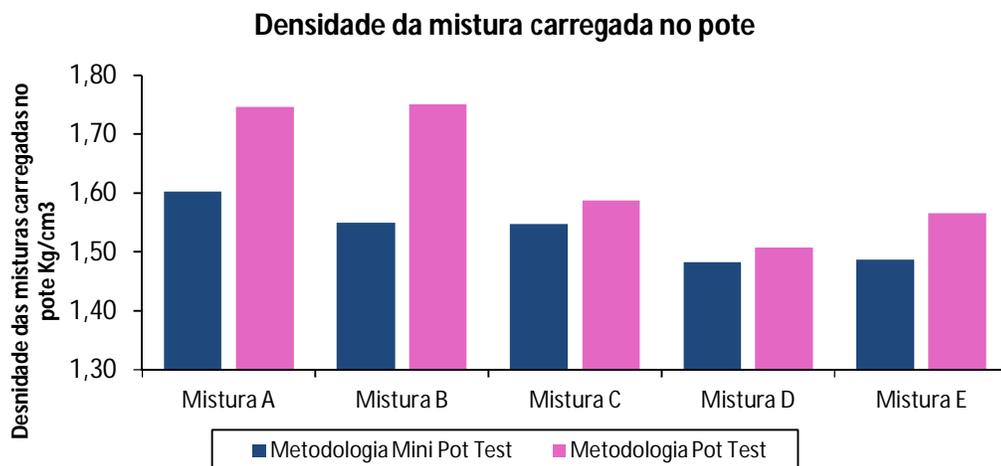


Figura 5.5: Gráfico de densidade das misturas carregadas no pote da metodologia do sinter pot test e no pote da da metodologia do mini pot test.

Observa-se que variações na massa de mistura carregada nos potes ocorrem tanto devido a composição granulométrica quanto devido a densidade específica de cada

mistura. A maior presença de partículas finas nas misturas eleva a densidade da mistura aumentando a massa carregada no equipamento.

A mistura B por apresentar maior quantidade de partículas finas e elevada densidade justificam maior massa no carregamento dos potes.

A menor massa de carregamento observada para a mistura D pode ser justificada pela elevada participação de minérios australianos grossos.

### *Parâmetros operacionais*

Durante os ensaios de sinterização realizados no trabalho foram mantidos constantes parâmetros operacionais como: a altura da camada de sinterização, a pressão de sucção de ar, a temperatura e o tempo de ignição. A tabela 6.3 compara os valores destes parâmetros assumidos durante a realização das simulações físicas.

Tabela 5.1: Comparação entre os valores dos parâmetros operacionais assumidos durante a realização das simulações físicas sob a metodologia do pot test e os valores assumidos nas simulações física sob a metodologia do mini pot test.

	<i>Altura da camada (mm)</i>	<i>Altura da camada de forramento (mm)</i>	<i>Temperatura de ignição (°C)</i>	<i>Tempo de Ignição (seg)</i>	<i>Pressão de sucção (mm H2O)</i>	<i>Tempo de resfriamento (seg a 500 mm H2O)</i>	<i>Finos de retorno</i>
Metodologia Mini Pot Test	500	15	1000	90	800	300	30
<b>Metodologia Pot Test</b>	700	20	1000	90	1000	300	30

Outros parâmetros operacionais como a variação de temperatura, a pressão do ar ao longo da simulação e o comportamento do fluxo de gás na caixa de vento foram monitorados para o controle do andamento dos ensaios.

As figuras 5.6 e 5.7 mostram o monitoramento da temperatura e pressão ao longo das simulações sob a metodologia do mini pot test e do sinter pot test.

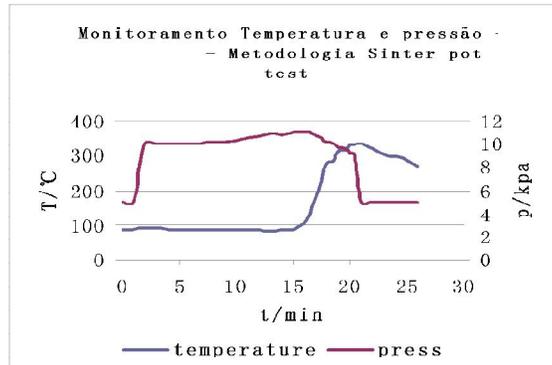


Figura 5.6: Gráfico do monitoramento de temperatura e pressão ao longo das simulações físicas sob a metodologia do sinter pot.

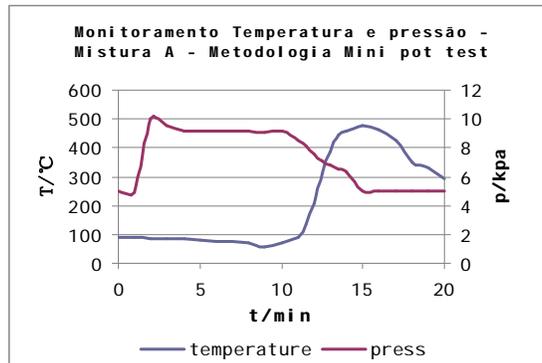


Figura 5.7: Gráfico do monitoramento de temperatura e pressão ao longo das simulações físicas sob a metodologia do mini pot test.

O comportamento dos parâmetros controlados foi semelhante em todos os ensaios realizados. No início dos ensaios há um pico na pressão na caixa de vento devido à pressão inicial de sucção do exaustor. Em seguida, com o andamento da sinterização da mistura e o deslocamento da frente de queima ao longo do leito ocorre a redução gradual da pressão. A pressão se estabiliza quando não houver mais variação de

resistência do leito, ou seja, quando a frente de queima atingir o final do leito, ou seja, quando todo o leito tiver sido sinterizado.

A temperatura e o fluxo de ar na caixa de vento apresentam um comportamento ao longo do processo de sinterização inverso ao comportamento da pressão. Com o deslocamento da frente de queima e a consequente sinterização do leito, a temperatura na caixa de vento assim como o fluxo de gás se eleva gradualmente. O pico de temperatura coincide com a estabilidade da pressão, ou seja, com o final da sinterização de todo o leito.

### ***Obtenção da simulação válida***

A sequencia de ensaios para a validação do comportamento das misturas através de metodologias de simulação física é semelhante para as duas metodologias abordadas. A obtenção da simulação válida ocorre a partir da realização de diversas queimas para o ajuste de parâmetros. Os principais parâmetros ajustados são: o balanço dos finos de retorno e a umidade ótima das misturas.

### ***Ajuste de finos de retorno***

As primeiras queimas são realizadas para o ajuste da geração de finos de retorno. Inicialmente o calculo do balanço de massa das misturas foi desenvolvido visando a obtenção de 30 % de finos de retorno. No cálculo do balanço de a dosagem de combustível foi fixada em 4%.

A quantidade de finos gerado na queima inicial indica a tendência de ajuste na dosagem do combustível. A partir de então, foi realizada uma sequencia de ensaios em que foram feitas alterações na dosagem de combustível das misturas com objetivo de otimizar a composição da mistura de sinterização que produza uma quantidade de finos o mais próximo possível a 30%.

As figuras 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 mostram gráficos que relacionam os ajustes da produção de finos de retorno em função da adição de combustível nas misturas

processadas sob as diretrizes das duas metodologias de simulação física consideradas. Nestes gráficos foi traçado uma linha (vermelha) que representa o ajuste da produção de finos em função da razão entre a geração de finos da simulação física pelo valor desejado de geração de finos, estipulado neste trabalho em 30%.

### Ajuste da produção de finos de retorno - Mistura A

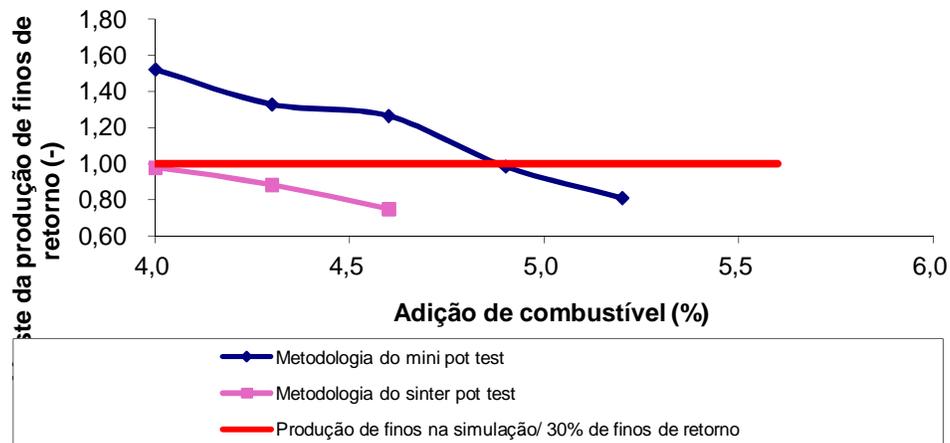


Figura 5.8: Curvas de ajuste da produção de finos de retorno pela adição de combustível na mistura A.

### Ajuste da produção de finos de retorno - Mistura B

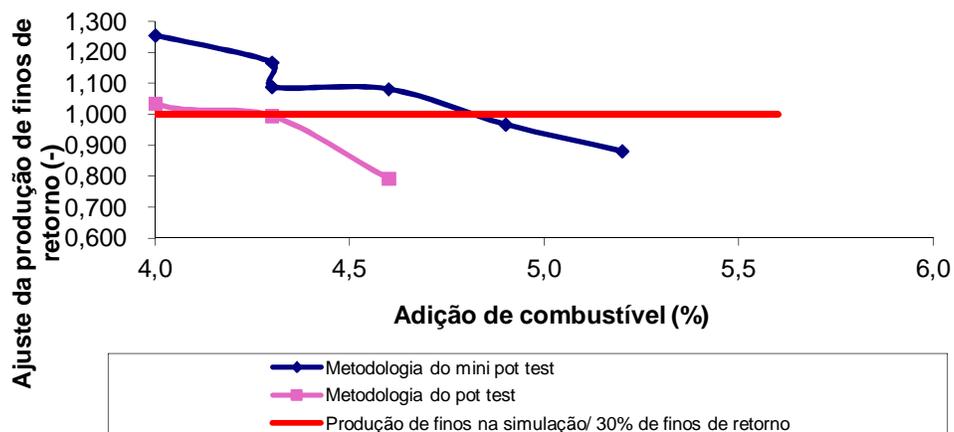


Figura 5.9: Curvas de ajuste da produção de finos de retorno pela adição de combustível na mistura B.

### Ajuste da produção de finos de retorno - Mistura C

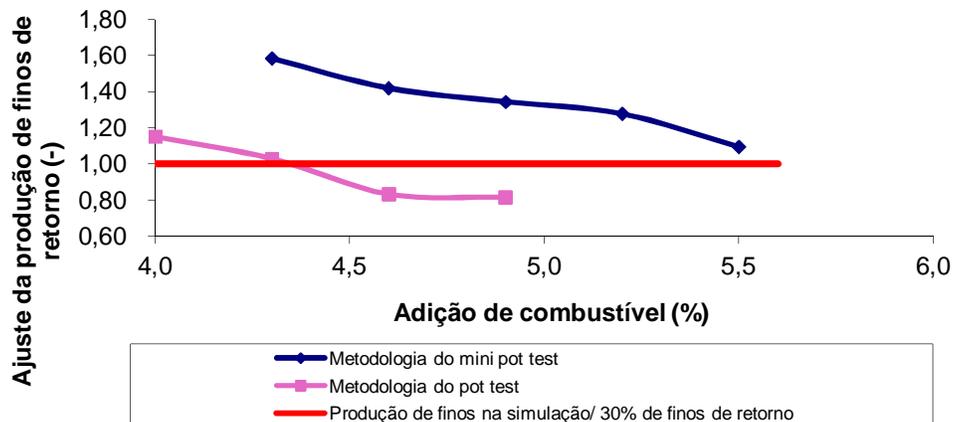


Figura 5.10: Curvas de ajuste da produção de finos de retorno pela adição de combustível na mistura C

### Ajuste da produção de finos de retorno - Mistura D

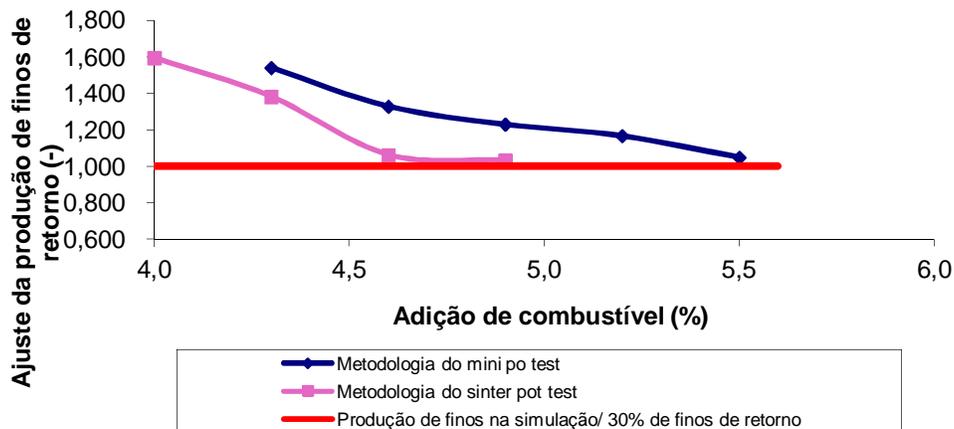


Figura 5.11: Curvas de ajuste da produção de finos de retorno pela adição de combustível na mistura D

### Ajuste da produção de finos de retorno - Mistura E

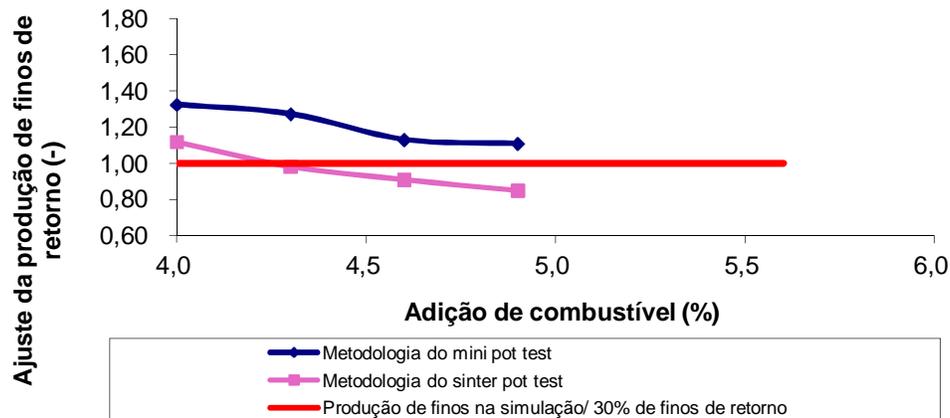


Figura 5.12: Curvas de ajuste da produção de finos de retorno pela adição de combustível na mistura E

Pelos gráficos pode-se perceber que após a realização da sequencia de ensaios variando a dosagem de combustível da mistura foi possível otimizar a composição de cada mistura de sinterização. A composição que apresentar a produção de finos de retornos mais próximo do valor objetivado no trabalho, 30%, foi a composição otimizada de cada mistura.

Percebe-se que o comportamento das cinco misturas, à medida que se adiciona o combustível, é semelhante para aplicação das duas metodologias. A adição de combustível à mistura reduz a produção de finos. Este comportamento era esperado, pois maiores participações de combustível na mistura de sinterização contribuem para o aumento da resistência do sinter reduzindo a produção de finos de retorno.

Para as misturas A, B observa-se que o aumento excessivo de combustível provoca redução drástica da geração de finos. Este comportamento é observado graficamente pelo cruzamento da linha de razão. Nestes casos a composição selecionada foi a composição cuja produção de finos mais se aproximasse de 30%. Como por exemplo, a mistura A em que a adição de 5,5 reduz a razão da produção do ensaio para 0,8. Para esta mistura a composição otimizada continha 5,0% de combustível.

Para as misturas C, D e E não observa-se o cruzamento da linha vermelha. A seleção da composição das misturas correspondeu à composição que mais se aproximou da linha vermelha, ou seja a composição cuja produção de finos foi mais próxima de 30%.

Considerando a metodologia do mini pot test, a dosagem de combustível para o ajuste de finos para as cinco misturas variou apenas 0,5%. Para esta metodologia foi necessário dosar 5 a 5,5% de combustível.

A dosagem de combustível para a sinterização das cinco misturas sob a metodologia do sinter pot test também foi semelhante entre as cinco misturas avaliadas. A variação da dosagem de combustível também foi de 0,5% sendo necessário dosar apenas 4 a 4,5% de combustível.

A perda de calor é favorecida em equipamentos menores, pois estes apresentam maior taxa de transferência de calor por possuírem proporcionalmente maior área (parede) por unidade de massa de sinter do que ensaios que trabalham com equipamentos maiores. A maior facilidade de perder calor favorece retração da mistura e a formação de caminhos preferenciais de ar através das paredes do pot (efeito parede), o que favorece ainda mais a perda de calor em metodologias de pequeno porte. De acordo com LOO, C. E. et al. <sup>(6)</sup> a tendência a maior perda de calor pelas paredes do pote em metodologias de simulação física de pequena escala produz produtos com menor resistência havendo maior formação de finos. Isto justifica a maior tendência de elevação do consumo de combustível na composição das misturas submetidas à metodologia do mini pot.

### ***Determinação da umidade ótima***

Seguindo a sequência de ensaios para a validação do comportamento das misturas após a realização das queimas de ajuste da dosagem de combustível foram realizadas queimas com objetivo de definir a umidade ótima de cada uma das misturas.

Como citado anteriormente, para o cálculo do balanço de massa foi estipulado 7% de umidade nas misturas.

De acordo com Y.F.Ravat et ali <sup>(5)</sup> a umidade das misturas auxilia aglomeração das partículas favorecendo a permeabilidade do leito e influenciando diretamente a

produtividade do processo de sinterização. Mas o excesso de umidade pode acabar prejudicando a formação de grânulos e como consequência a permeabilidade do leito e a produtividade da sinterização.

A seqüência de simulações para o ajuste da umidade (obtenção da umidade ótima) foi realizada visando a produtividade máxima das misturas. Após a queima com 7% de umidade foram realizadas queimas subseqüentes para cada uma das misturas em que a umidade da mistura foi elevada progressivamente de 0,5 em 0,5 %.

A adição de água à mistura ocorreu até que fosse observada a influência negativa na produtividade da queima. A inversão da influência da umidade foi identificada graficamente através da obtenção do ponto de inflexão na curva de produtividade. Esta inflexão garante o alcance da produtividade máxima a partir da variação da adição de água às misturas de sinterização.

As figuras 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17 mostram as produtividades obtidas na sinterização das misturas em função da adição de água. A da adição de água nas misturas variou 1,5%. A umidade ótima das misturas variou de 8 a 9,5%.

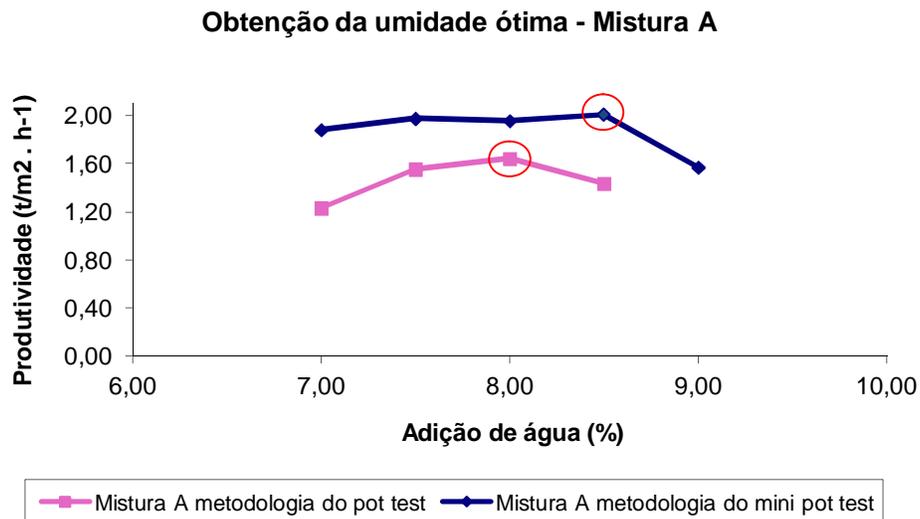


Figura 5.5: Obtenção da umidade ótima da Mistura A test

### Obtenção da umidade ótima - Mistura B

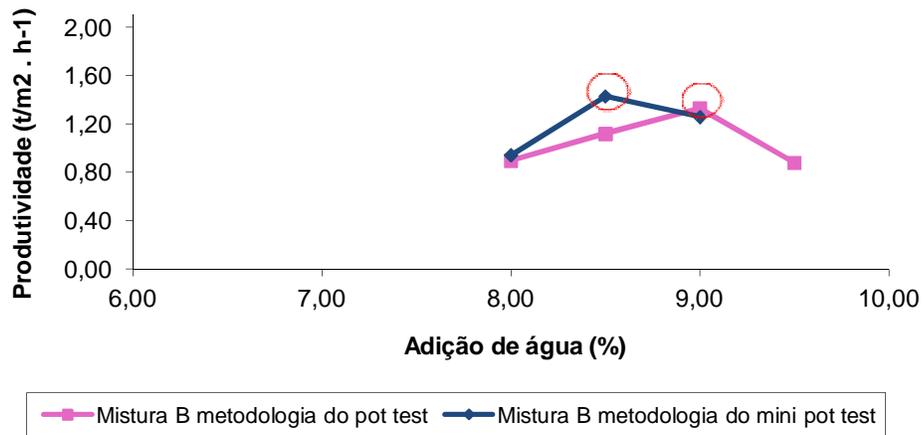


Figura 5.6: Obtenção da umidade ótima da Mistura B test

### Obtenção da umidade ótima - Mistura C

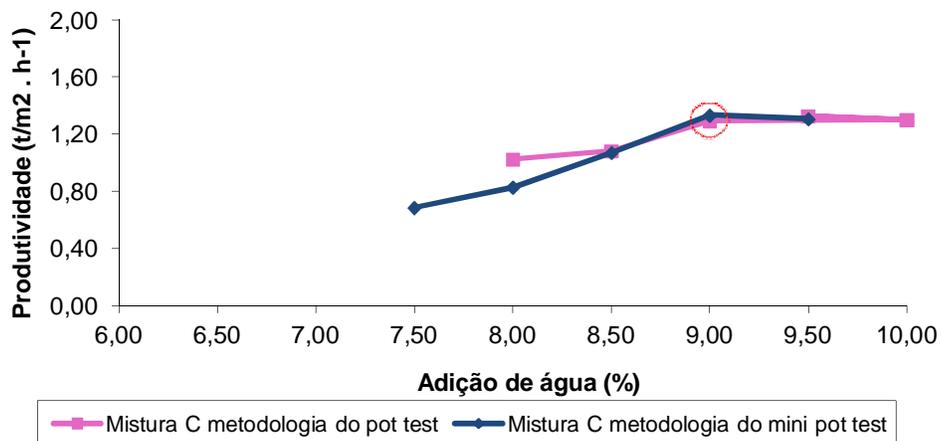


Figura 5.7: Obtenção da umidade ótima da Mistura C

### Obtenção da umidade ótima - Mistura D

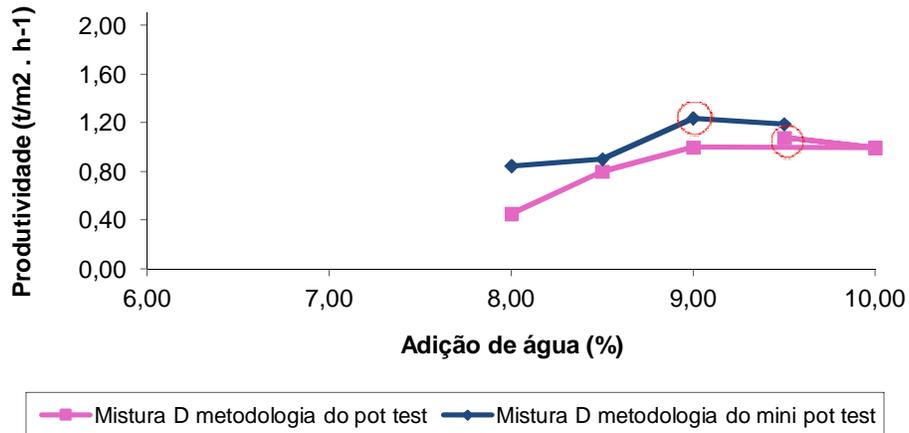


Figura 5.8: Obtenção da umidade ótima da Mistura D

### Obtenção da umidade ótima - Mistura E

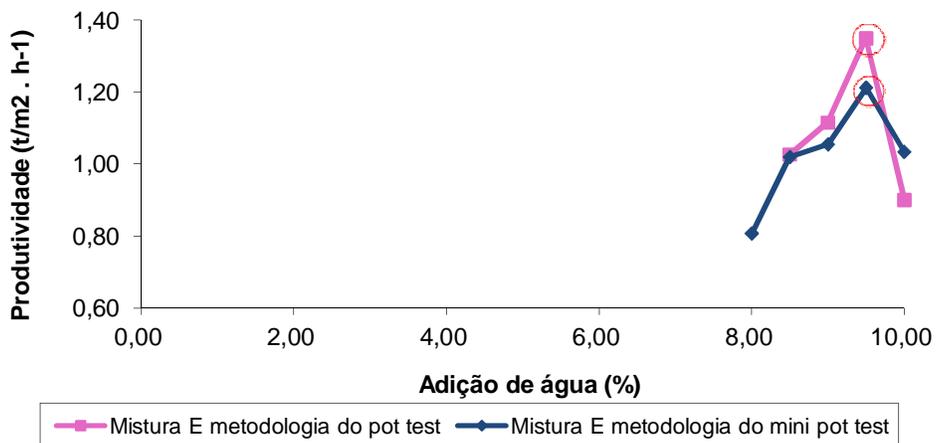


Figura 5.9: Obtenção da umidade ótima da Mistura E

Pelos gráficos verifica-se que o ponto de inflexão da produtividade de todas as misturas foi atingido indicando que o prejuízo do excesso de umidade à aglomeração. Encontram-se destacadas nos gráficos as umidades ótimas atingidas para cada mistura tanto para a metodologia do mini pot test quanto para a metodologia do sinter pot test.

Nota-se um comportamento semelhante de uma mesma mistura quando submetida às duas metodologias de simulação. Semelhança tanto na quantidade de água adicionada quanto nos níveis de produtividade atingidos. Este comportamento era esperado pela similaridade observada entre as metodologias durante a análise de formação de grânulos, figuras 5.1 e 5.2.

Quando se compara as diferentes misturas nota-se diferenças entre as produtividades máximas atingidas. A diferença no desempenho da sinterização é devida a diferenças nas composições das misturas.

A mistura A apresenta uma produtividade máxima maior que as demais misturas, mesmo com a menor adição de água. O destaque da produtividade da mistura A em relação as das outras misturas ocorre devido a maior proporção de partículas nucleantes e intermediárias. A presença destas partículas favorece a formação de grânulos e conseqüentemente a permeabilidade do leito que por sua vez favorece o desempenho da sinterização. Este mesmo comportamento já tinha sido observado pela maior facilidade de formação de grânulos pela mistura está mostrada nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3.

A produtividade máxima das demais misturas gira em torno de  $1,2 \text{ (t/m}^2\text{.h}^{-1}\text{)}$ . Dentre as misturas B, C, D e E a mistura D é que apresenta o menor desempenho da sinterização. Esta mistura apresenta o maior percentual de material grosso, maior que 6,3mm devido a grande participação de minérios *AUSgrosso* em sua composição. Partículas com esta granulometria prejudica a formação dos grânulos. Este comportamento também está mostrado nos gráficos das figuras 5.1, 5.2 e 5.3 em que os menores grânulos são obtidos no processamento da mistura D.

Após a seqüência de queimas para otimização da composição da mistura e das variáveis do processo foi obtida a simulação válida de cada uma das misturas de sinterização para cada uma das metodologias de simulação física propostas.

Por fim, para avaliar a repetibilidade dos resultados das simulações foi realizada uma queima duplicata para cada uma das simulações válidas obtidas. As variáveis de processo das metodologias foram avaliadas com base nos valores obtidos nas simulações válidas e suas duplicatas.

### **5.1.3 Variáveis de processo de sinterização – Comparação entre as metodologias**

O monitoramento das variáveis de processo obtidas nas simulações física avaliam impactos nestas devido a mudanças na metodologia de simulação física aplicada e devido a variações na composição das misturas de sinterização.

A análise comparativa do comportamento das misturas perante as duas metodologias busca validar a metodologia de menor escala, mini pot test, ainda pouco difundida.

Para a avaliação das metodologias de simulação física considerada foram consideradas as seguintes variáveis: tempo de sinterização, produtividade da sinterização, rendimento da sinterização e consumo de combustível da sinterização.

A tabela 9.4 do anexo 1 relaciona as variáveis de processo referente a sinterização de cada mistura sob as diretrizes das duas metodologias de simulação física.

#### **➤ Tempo de sinterização:**

As variáveis de processo tempo de sinterização e velocidade de chama foram monitoradas com objetivo de se avaliar ganhos de agilidade da aplicação da metodologia de simulação física mini pot test.

A figura 5.15 mostra o gráfico que compara o tempo gasto para a sinterização completa de cada uma das misturas nas metodologias de simulação física consideradas.

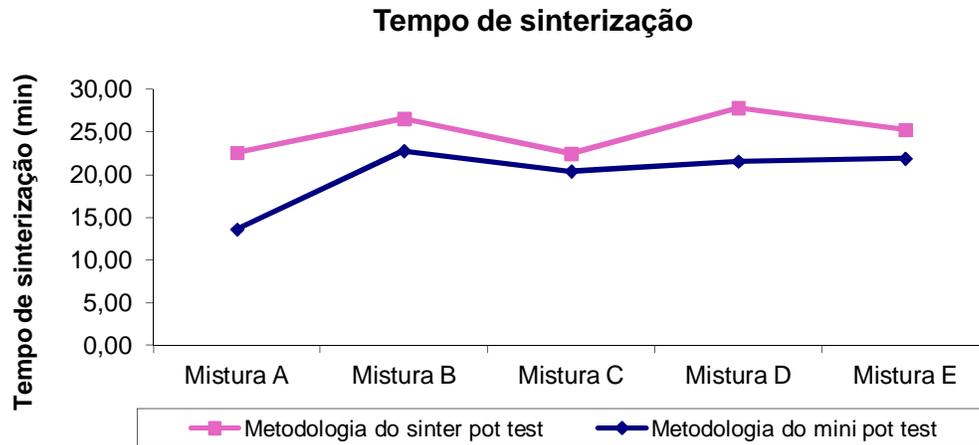


Figura 5.10: Comparação entre o tempo gasto para a sinterização das misturas sob as diretrizes de cada uma das metodologias de simulação física.

O tempo de sinterização das misturas sob a metodologia do sinter pot test varia de 22,5 minutos a 27 minutos. Já sob a metodologia do mini pot test o tempo de sinterização varia de 20 a 23 minutos.

Os dados indicam pequena variação no tempo de sinterização entre as metodologias de simulação física, de no máximo 5 min. O tempo de sinterização dos ensaios da metodologia do mini pot test foi ligeiramente menor comparado com os ensaios da metodologia do sinter pot test. Para a diferença de dimensionamento dos potes e para a diferença na quantidade de massa consumida nas duas metodologias considera-se a diferença entre o tempo de sinterização das metodologias bastante sutil. Apesar de sutil a variável indica maior agilidade na aplicação da metodologia do mini pot test. Esta tendência ocorre devido ao menor dimensionamento e a menor quantidade de massa da primeira metodologia.

Considerando a mesma metodologia de simulação, a variação da composição das misturas de sinterização não impacta diretamente no tempo de sinterização. Esta variável foi bastante semelhante para a maioria das misturas, não houve variação do tempo de sinterização destas misturas maiores que 3min.

Apenas a mistura A se destaca da tendência seguida pelas outras misturas por apresentar maior distorção em relação à variável tempo de sinterização. Os dados das variáveis

confirmam o melhor desempenho de sinterização da mistura A conforme já indicava os ensaios de determinação da umidade ótima realizados previamente.

A figura 5.16 mostra o gráfico que compara a velocidade da frente de queima da sinterização completa de cada uma das misturas perante as metodologias de simulação física consideradas.

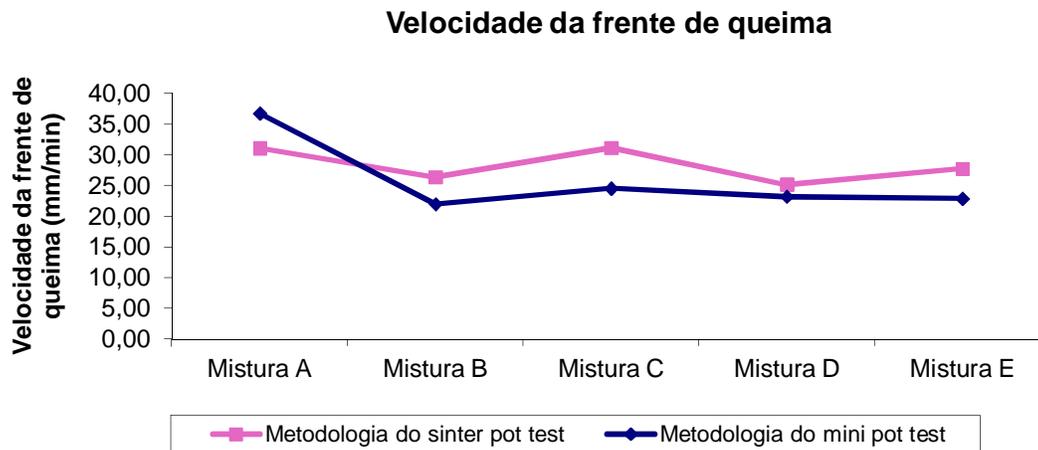


Figura 5.116: Comparação entre as velocidades da frente de queima da sinterização das misturas sob as diretrizes de cada uma das metodologias de simulação física.

Os dados de velocidade da frente de queima confirmam a tendência apresentada pelos dados de variação de tempo de sinterização entre as metodologias e entre a sinterização das misturas. Estas variáveis apresentam comportamento semelhante quando simuladas considerando as duas metodologia de simulação física abordadas.

A velocidade de frente de queima para as duas metodologias mostrou-se muito semelhante. Mas nota-se pequena tendência de aumento da velocidade de chama na aplicação da metodologia do sinter pot test em relação à metodologia do mini pot test.

A análise conjunta do tempo de sinterização com a variável de velocidade da frente de queima justifica a semelhança do tempo de sinterização das misturas quando simuladas sob as diretrizes das duas metodologias. Por apresentar maior velocidade de frente de queima a metodologia do sinter pot test mesmo com maior dimensionamento do pot e maior quantidade de massa apresenta tempo de sinterização semelhante a metodologia do mini pot test.

A velocidade da frente de queima assim como a variável tempo de sinterização também não foi impactada pela variação na composição das misturas de sinterização.

➤ *Consumo de combustível na sinterização:*

O monitoramento da variável consumo de combustível foi feito para se avaliar impactos nesta variável devido a variações na metodologia de simulação física.

A figura 5,17 mostra o gráfico da comparação o consumo de combustível na sinterização de cada uma das misturas em ambas as metodologias de simulação física consideradas.

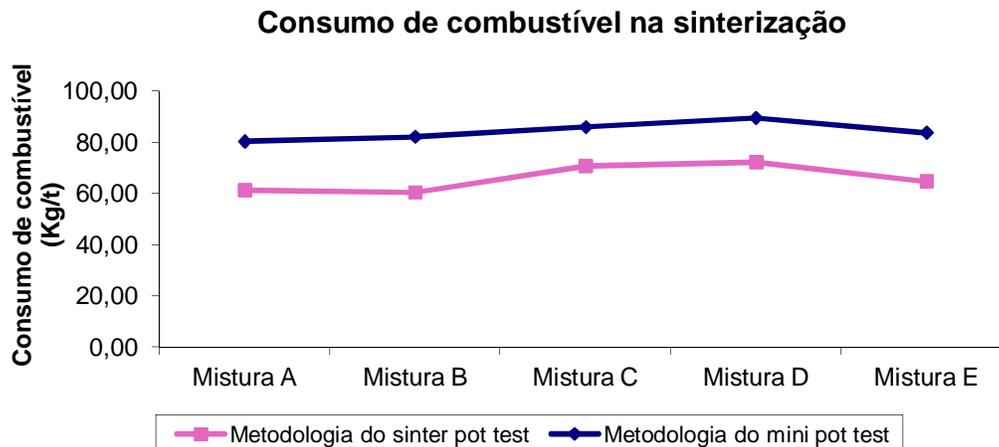


Figura 5.12: Comparação entre o consumo de combustível na sinterização das misturas sob as diretrizes de cada uma das metodologias de simulação física.

Os dados indicam maior consumo de combustível na sinterização das misturas quando elas são submetidas à metodologia do mini pot test. O consumo médio de combustível da metodologia do mini pot test foi de 84 kg/t. Já o consumo médio de combustível da metodologia do sinter pot test foi de 66 kg/t.

Esta tendência confirma o comportamento das misturas ao longo dos ensaios de ajustes de finos de retorno realizados para a otimização da queima. O maior consumo de combustível pela metodologia do mini pot test é justificado pela necessidade da dosagem de combustível compensar a perda de calor mais intensa de equipamentos menores devido a maior taxa de transferência de calor e a maior influência do efeito parede.

A necessidade de se elevar a dosagem de combustível nas simulações da metodologia do mini pot em relação às simulações da metodologia do sinter pot test para o ajuste do processo impacta diretamente na qualidade metalúrgica dos produtos de sinterização obtidos nas duas metodologias. A análise e comparação da qualidade dos produtos serão baseadas no impacto no índice de tamboramento dos produtos de sinterização de cada mistura.

Apesar da diferença no consumo de combustível pelas duas metodologias a tendência de consumo de combustível em cada mistura é semelhante.

Considerando a mesma metodologia de simulação, o consumo de combustível na sinterização das misturas não é significativamente impactado pela variação na composição das misturas de sinterização. Os dados não mostram variação do consumo de combustível maior que 10 kg/t.

➤ ***Rendimento da Sinterização:***

O rendimento da sinterização é a variável que avalia a quantidade de sinter produzido. É considerado produto de sinterização apenas o material com granulometria maior que 5mm. O monitoramento desta variável de processo permite avaliar impactos na qualidade física e metalúrgica do sinter devido aos impactos de alteração da metodologia de simulação física.

A figura 5.18 mostra o gráfico que compara o rendimento da sinterização de cada uma das misturas em ambas as metodologias de simulação física consideradas.

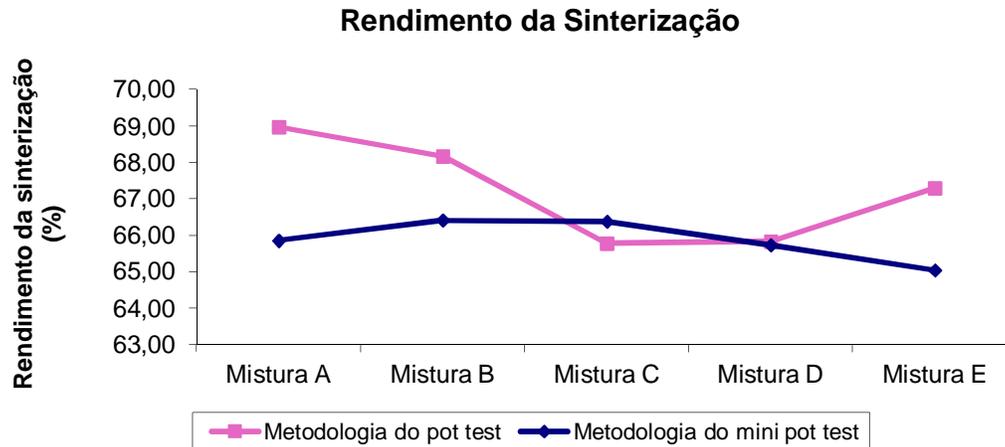


Figura 5.18: Comparação entre da produtividade da sinterização das misturas sob as diretrizes de cada uma das metodologias de simulação física.

O rendimento de sinterização não apresenta comportamento semelhante na aplicação das duas metodologias. Os dados indicam menor rendimento da sinterização das misturas quando elas são submetidas à metodologia do mini pot test. A maior taxa de transferência de calor em potes menores leva a formação de produtos menos resistentes. Dessa forma a aplicação da metodologia do mini pot test leva a maior formação de finos e o sinter produzido apresenta menor resistência à degradação. A resistência do sinter será avaliada pelo impacto no índice de tamboramento dos produtos de sinterização.

A resistência à permeabilidade é a variável que indica a capacidade do fluxo de gás de fluir no leito de sinterização.

A figura 5.19 mostra o gráfico que compara a resistência à permeabilidade do leito de sinterização de cada uma das misturas em ambas as metodologias de simulação física consideradas.

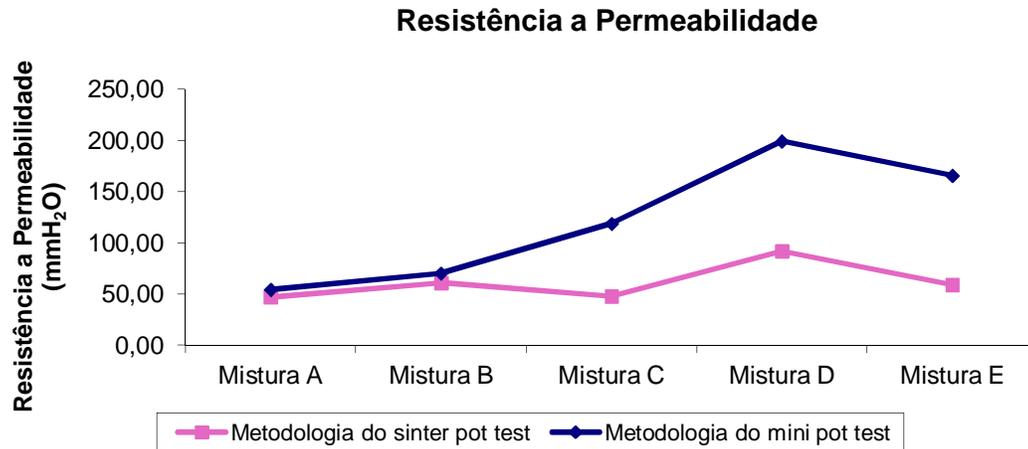


Figura 5.13: Comparação entre a resistência a permeabilidade do leito de sinterização das misturas sob as diretrizes de cada uma das metodologias de simulação física.

Os dados indicam maior permeabilidade do leito quando aplicamos a metodologia do sinter pot test. A maior resistência à permeabilidade da metodologia do mini pot pode ser justificada pela menor resistência dos produtos desta metodologia e a consequente formação de finos.

Tanto a variável rendimento da sinterização quanto a variável de resistência à permeabilidade se mostraram sensíveis à variação na composição das misturas de sinterização.

Apesar de algumas misturas apresentarem diferentes respostas à resistência à permeabilidade quando simuladas fisicamente seguindo as diretrizes das duas metodologias abordadas o gráfico mostra comportamentos semelhantes desta variável perante as metodologias.

Maior resistência a permeabilidade e consequentemente menor rendimento da sinterização da mistura D ocorre devido a grande presença de material grosso nesta mistura e a menor capacidade desta de formar grãos. A maior resistência desta mistura a permeabilidade pode ser um dos motivos da sinterização desta mistura apresentar menor velocidade de queima e consequentemente demorar mais para ser concluída.

A menor resistência a permeabilidade é notada durante as sinterizações da mistura A tanto para a metodologia do sinter pot test quanto para a metodologia do mini pot test.

Isto pode ser justificado de acordo com as características físicas da mistura A. Antagonicamente à mistura D a mistura A é uma mistura que apresenta facilidade na formação de grânulos oferecendo baixa resistência à permeabilidade. Esta característica desta mistura também justifica o maior rendimento do processo, a maior velocidade da frente de queima e o menor tempo da sinterização.

➤ **Produtividade de sinterização:**

A produtividade da sinterização é a variável que mede a quantidade produzida na sinterização por unidade de área e tempo. Esta variável é diretamente influenciada pela permeabilidade do leito e indiretamente pela granulação da mistura uma vez que o fluxo de gás é o responsável pelo deslocamento da frente de queima e conseqüentemente pela sinterização. Por contabilizar diretamente a produção de sinter a variável produtividade é a variável de processo mais relevante na avaliação comparativa das metodologias.

A figura 6.26 compara a produtividade da sinterização de cada uma das misturas nas metodologias de simulação física consideradas.

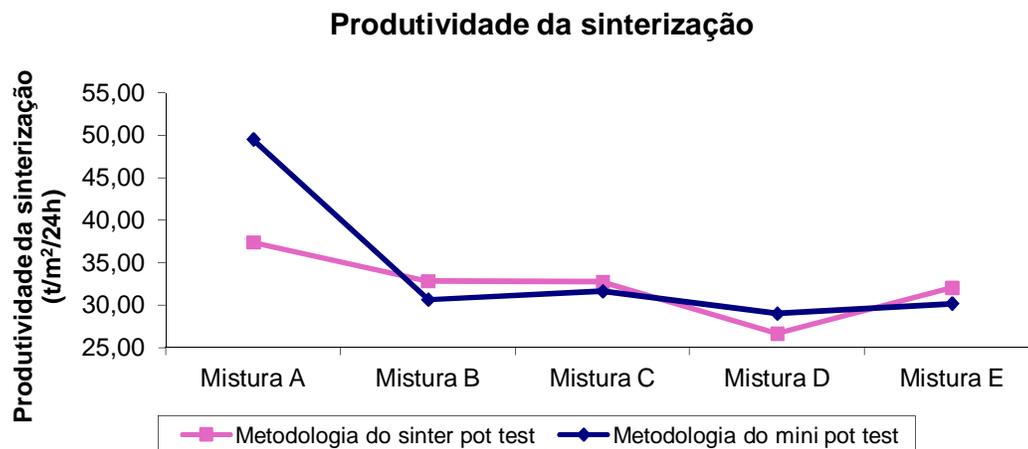


Figura 5.14: Comparação entre da produtividade da sinterização das misturas sob as diretrizes de cada uma das metodologias de simulação física.

Nota-se que além de ser sensível à variação da composição da mistura de sinterização a produtividade apresenta comportamento semelhante nas simulações físicas realizadas sob as diretrizes das duas metodologias. Devido a maior resistência dos produtos produzidos pela metodologia sinter pot test as produtividades atingidas nesta metodologia foi maior do que as referentes à metodologia do mini pot test. A produtividade média das misturas B, C e E atingida nas simulações físicas das duas metodologias foi 31 t/m<sup>2</sup>/24h.

Também considerando a variável produtividade as misturas A e D mostraram peculiaridades no desempenho da sinterização.

A produtividade da mistura A em ambas as metodologias é muito maior do a produtividade obtida na sinterização das outras misturas. A produtividade da mistura A atinge 38 t/m<sup>2</sup>/24h quando a simulação da sinterização foi feita sob as diretrizes da metodologia do sinter pot test. O valor da produtividade da mistura A sob as diretrizes da metodologia do mini pot test foi 49 t/m<sup>2</sup>/24h.

Já a produtividade da mistura D é a menor atingida. Quando submetida às diretrizes da metodologia do mini pot test a mistura D apresenta uma produtividade de 29 t/m<sup>2</sup>/24h. Já quando aplicamos a metodologia do sinter pot test a produtividade atingida foi de 27 t/m<sup>2</sup>/24h.

Além do destaque em relação aos valores atingidos houve uma inversão na tendência da produtividade atingida pelas metodologias de simulação física das misturas A e D. Nas simulações destas misturas a produtividade atingida na metodologia do mini pot test superou a produtividade da metodologia do sinter pot test. O destaque perante o comportamento destas misturas em relação às demais ocorre devido às peculiaridades da composição granulométrica destas misturas.

Tanto a elevada presença de partículas nucleantes e intermediárias que favorece a granulação da mistura A quanto a maior participação de partículas grossas (maiores que 6,3mm) na mistura D reduzem a presença de finos na mistura durante a sinterização. Assim a interferência negativa dos finos na permeabilidade do leito característica das simulações físicas do mini pot é reduzida nos ensaios destas misturas. Assim devido a redução da geração dos finos e a maior retração da mistura e a formação de caminhos

preferenciais característica dos ensaios de pequeno porte a produtividade atingidas nas simulações físicas realizadas sob as diretrizes da metodologia do mini pot test superam as atingidas nas simulações da metodologia do sinter pot test.

#### ***5.1.4 Variáveis de processo de sinterização – Validação da metodologia de simulação física do mini pot test***

As variáveis tempo de sinterização, consumo de combustível, velocidade da frente de queima, resistência a permeabilidade apresentaram comportamento semelhante nas simulações físicas das duas metodologias avaliadas. Todas as variáveis avaliadas mostram comportamento semelhante quando submetidas às diferentes metodologias de simulação.

A semelhança no comportamento destas variáveis durante as simulações da metodologia de pequeno porte, ainda pouco difundida, com as variáveis de processo de uma metodologia de simulação de maior escala fornece indícios favoráveis à validação do processo contemplado na primeira metodologia. Importante ressaltar que a semelhança nas variáveis de processo valida a metodologia do mini pot test apenas quanto a reprodução do processo. A validação quanto às propriedades físicas e metalúrgicas do produto produzido nas simulações físicas do mini pot test não pode ser atribuída ao comportamento do processo. A abordagem das propriedades do produto serão avaliadas a partir da análise dos produtos.

A partir da validação da metodologia do mini pot test será possível ampliar o domínio de misturas avaliadas em simulações físicas devido à menor necessidade de consumo de amostras desta metodologia.

A resistência à permeabilidade, a produtividade e o rendimento da sinterização mostraram certa sensibilidade perante a variação da composição da mistura de sinterização. Através da aplicação da metodologia do mini pot test será possível o desenvolvimento de um mapeamento mais detalhado da previsão dos impactos no processo de sinterização devido a variações na mistura.

### 5.1.5 Produto de sinterização

O sinter produzido pela sinterização das misturas apresenta características físicas e químicas de acordo com as características das misturas sinterizadas e das condições inerentes ao processo.

Avalia-se a interferência da variação da composição da mistura de sinterização e alterações na metodologia de simulações físicas na qualidade do produto formado.

#### *Caracterização do sinter – Caracterização física*

Os métodos de caracterização do sinter foi o mesmo para os produtos de sinterização da metodologia do sinter pot test e do mini pot test. A caracterização consistiu em uma análise metalúrgica de resistência do sinter.

Todas as simulações físicas produziram sinter. As figuras 5.19 e 5.20 mostram respectivamente a massa do bolo de sinter produzido pela sinterização das misturas sob as diretrizes da metodologia do mini pot test e sob a metodologia do sinter pot test. Do total do bolo de sinter apenas as frações maiores que 5mm é considerado produto. As demais partículas compõem os finos de retorno.

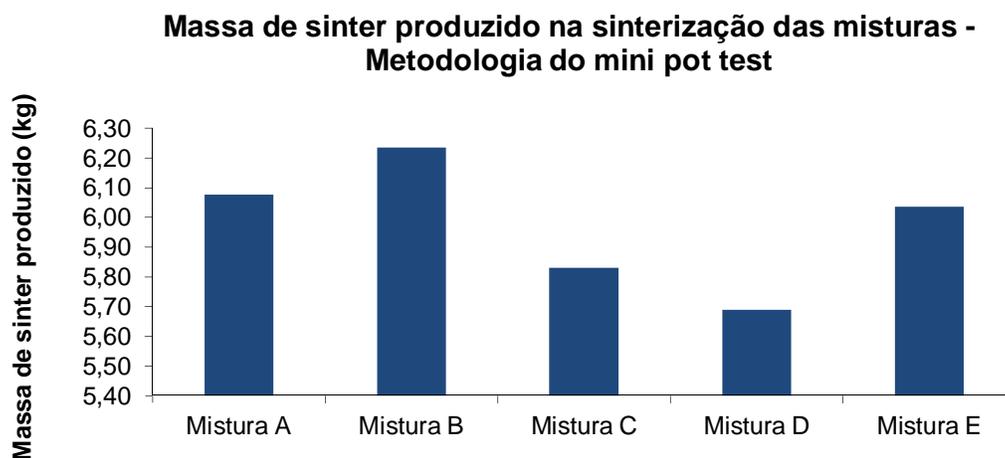


Figura 5.15: Massa de bolo de sinter produzido na sinterização das cinco misturas de sinterização- Metodologia do mini pot test.

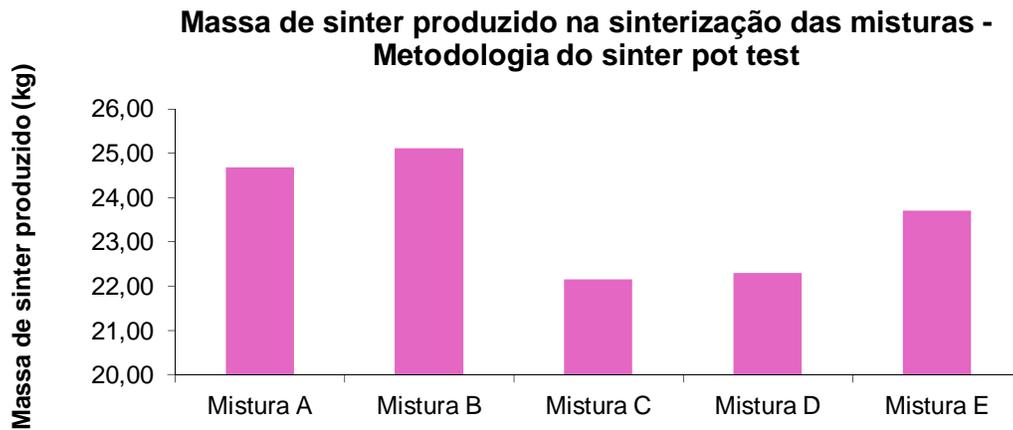


Figura 5.16: Massa de bolo de sinter produzido na sinterização das cinco misturas de sinterização - Metodologia do sinter pot test.

A resistência dos produtos produzidos foi medida pelo ensaio de tamboramento de amostras. O ensaio de tamboramento consiste em avaliar a granulometria do produto de sinterização após o tamboramento das amostras em um tambor padrão por um número de voltas também definidos.

O gráfico da figura 5.23 compara o índice de tamboramento do sinter (%+6,3mm) obtido para o produto de sinterização de cada uma das misturas considerando as duas metodologias de simulação considerada.

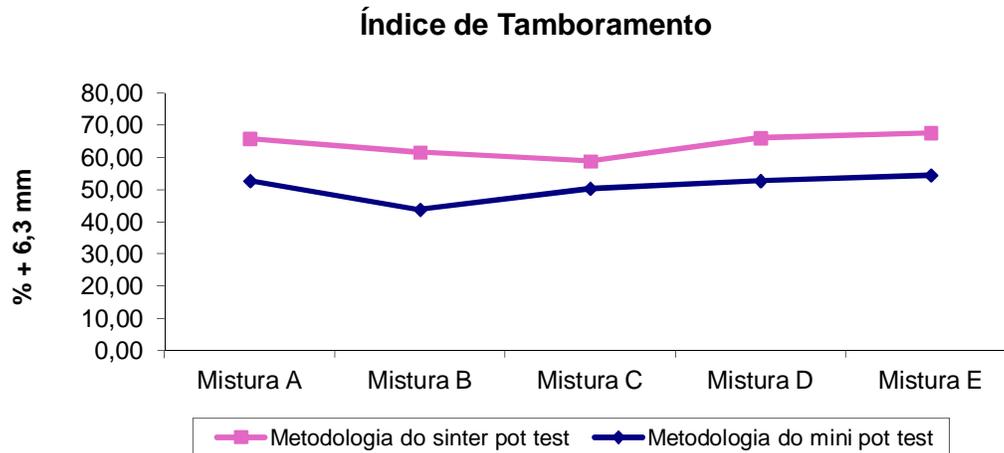


Figura 5.17: Comparação entre o índice de tamboramento dos produtos de sinterização das misturas sob as diretrizes de cada uma das metodologias de simulação física.

Maiores índices de tamboramento foram atingidos pelos produtos da sinterização realizada com as diretrizes da metodologia do sinter pot test. Para esta metodologia o índice de tamboramento (%+6,3mm) atinge 65%. Já para a metodologia do mini pot test o índice de tamboramento atingido foi de 50%.

Estes dados confirmam a tendência de formação de produtos menos resistentes por metodologias de simulação física de menor escala como a metodologia do mini pot test, devido a velocidade de formação do sinter e a maior taxa de transferência de calor nos equipamentos de menor porte.

Para as diferentes misturas não se percebe grande variação no índice de tamboramento.

### *Caracterização do sinter - Qualidade química*

O cálculo do balanço de massa desenvolvido antes da realização das simulações física estimou a qualidade química dos produtos de sinterização de cada uma das misturas. Os produtos de sinterização de cada mistura considerada foram caracterizados quimicamente após a realização das queimas das misturas.

Os produtos obtidos pela aplicação das duas metodologias de simulação física de sinterização apresentaram qualidade química bastante próxima à qualidade prevista pelo balanço de massa das misturas de sinterização avaliadas no trabalho.

As figuras 5.24, 5.25 e 5.26 mostram gráficos que comparam a qualidade dos produtos de sinterização calculada no balanço de massa e a qualidade obtida após a simulação física das misturas. Considerou-se os teores de sílica, alumina e a basicidade dos sinters produzido. Os resultados obtidos pela simulação física das misturas seguindo ambas as metodologias mostram boa aproximação com os resultados estimados no balanço de massa.

Observam-se no gráfico 5.24 desvios quanto a alumina do sinter obtido nas simulações e na estimada pelo balanço de massa. Apesar destes não serem muito grandes são significativos. Atribui-se esses desvios à diferença de combustível calculado no balanço de massa e a real quantidade adicionada à mistura. Uma vez que o cálculo do balanço de massa considera a adição de combustível fixa e a composição da mistura para as simulações físicas contempla ajustes na dosagem deste componente devido a otimização na geração de finos e a obtenção da umidade ótima. Menores variações são observadas para a sílica e basicidade do sinter, gráficos 5.25 e 5.26. Este comportamento também pode ser justificada dada a menor influencia da variação de combustível na determinação destes teores.

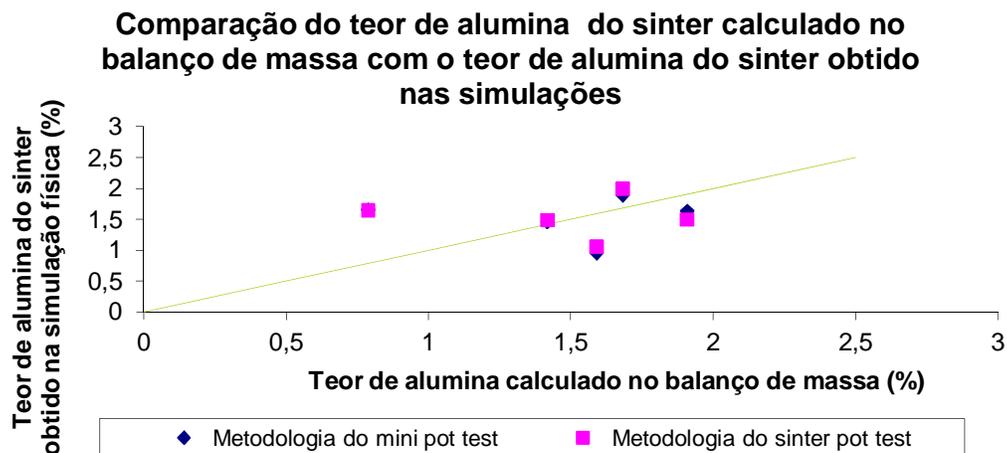


Figura 5.18: Comparação do teor de alumina do sinter calculado no balanço de massa com o teor de alumina do sinter obtido pelas metodologias de simulação física.

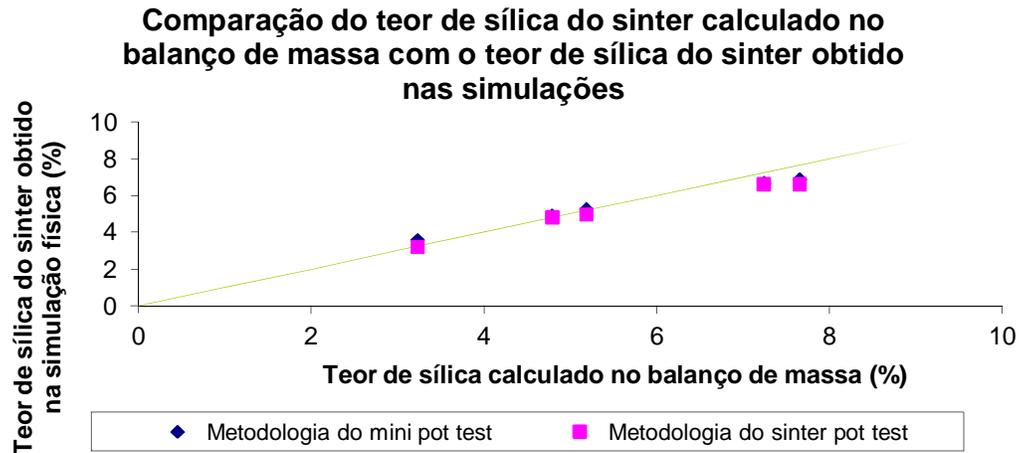


Figura 5.19: Comparação do teor de sílica do sinter calculado no balanço de massa com o teor de sílica do sinter obtido pelas metodologias de simulação física.

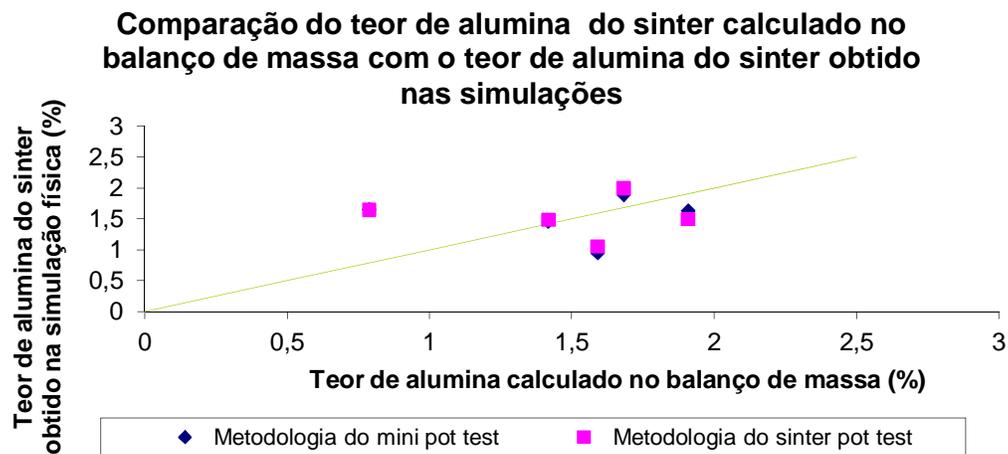


Figura 5.20: Comparação da basicidade do sinter calculado no balanço de massa com a basicidade do sinter obtido pelas metodologia de simulação física.

As figuras 5.27, 5.28 e 5.29 mostram gráficos que correlacionam as qualidades dos produtos obtidas na aplicação das duas metodologias quanto ao teor de sílica, alumina e para a basicidade do sinter.

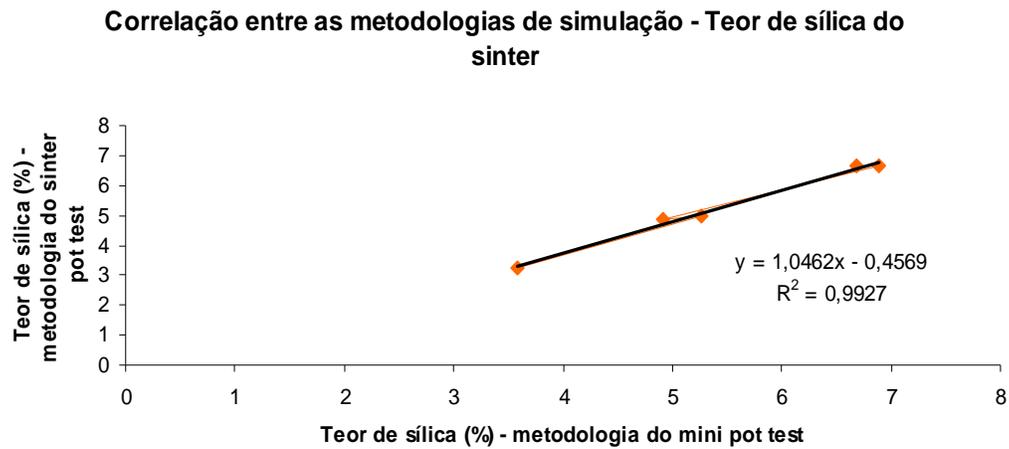


Figura 5.21: Comparação entre as metodologias de simulação física - Teor de sílica do sinter

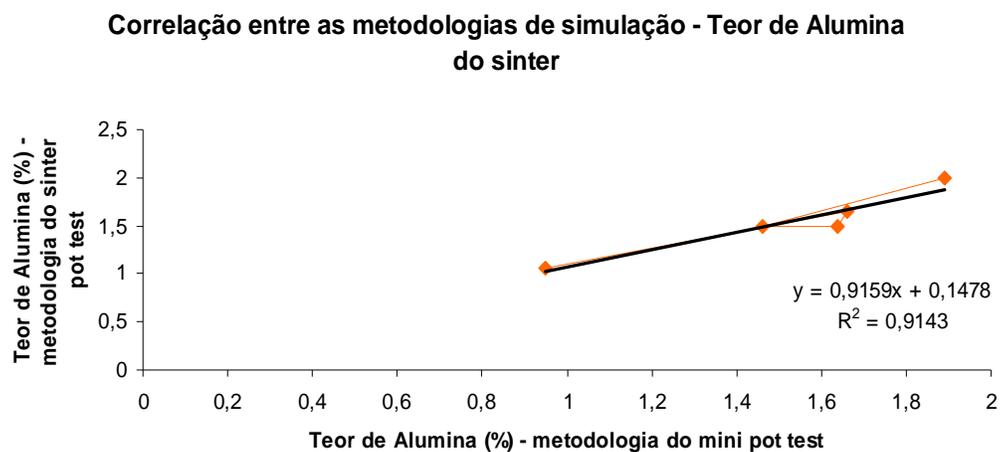


Figura 5.22: Comparação entre as metodologias de simulação física - Teor de alumina do sinter.

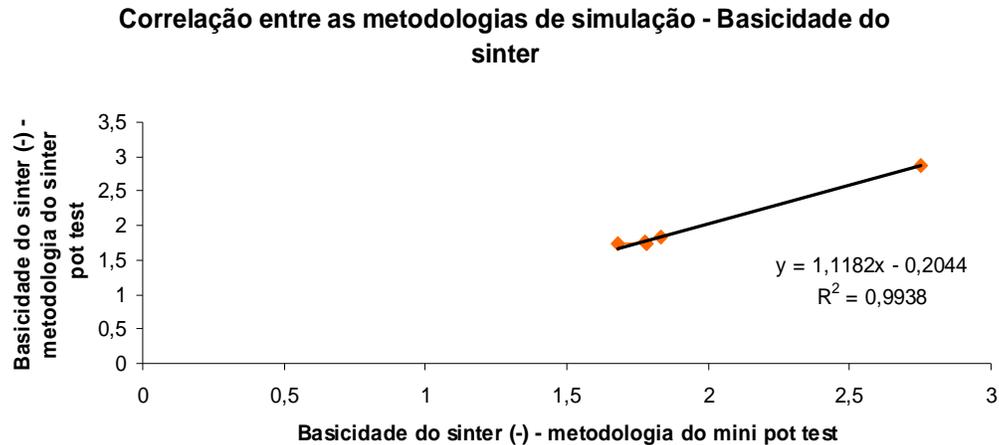


Figura 5.23: Comparação entre as metodologias de simulação física - Basicidade do sinter.

A análise química dos sínteres obtidos pela metodologia do mini pot test e dos produzidos pela metodologia do pot test são relativamente próximas para a maioria dos elementos considerados. Obteve-se boa correlação entre as metodologias de simulação física quando se compara a qualidade dos produtos produzidos

A capacidade das simulações realizadas sob a metodologia do mini pot test de reproduzir a qualidade química dos produtos de sinterização é outro fator que valida a aplicação desta metodologia e possibilita o aumento da dinamicidade na realização de simulações físicas para avaliação de impactos na sinterização devido a variações na composição da mistura de sinterização.

### 5.1.6 *Correlação entre metodologias de simulação física*

Após a análise das variáveis de processo obtidas na simulação física das cinco misturas sob as diretrizes da metodologia do sinter pot test e as da metodologia do mini pot test buscou-se obter correlações entre as metodologias abordadas. Para obter correlações entre a metodologia de simulação física mini pot test e a metodologia sinter pot test foram realizadas análises de regressão entre os resultados obtidos nas queimas para

algumas variáveis de processo. As variáveis correlacionadas foram: consumo de combustível, produtividade da sinterização e índice de tamboramento do sinter. Para as demais variáveis não foi possível obter resultados representativos.

➤ **Consumo de combustível:**

A figura 5.30 mostra a correlação entre a metodologia de simulação física mini pot test e a metodologia sinter pot test para a variável: consumo de combustível.

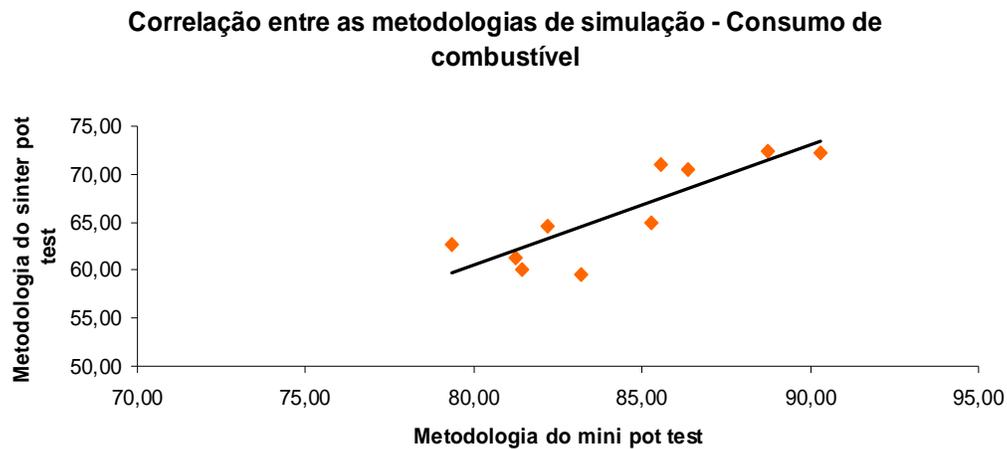


Figura 5.24: Correlação entre as metodologias de simulação física – Metodologia do mini pot test VS Metodologia do sinter pot test – Consumo de combustível.

$$\text{Combustível } I_{\text{Sinter-pot}} = 39,44 + 1,25 \cdot \text{Combustível } I_{\text{Mini-pot}} \quad (5.1)$$

Os dados mostram correlação razoável do consumo de combustível entre as duas metodologias abordadas. A equação (5.1) prevê o consumo de combustível da metodologia do sinter pot em função do consumo determinado na metodologia do mini pot test. O  $R^2$  obtido a partir da correlação entre os consumos de combustível apresentou foi 73%. Este  $R^2$  indica que 73% dos dados apresentam comportamento

semelhante quando submetidos às duas metodologias de simulação física, ou seja, a equação representa apenas 73% dos dados.

A tabela 5.2 mostra a análise de variância da equação (5.1). A regressão proposta para a correlação é validada pela análise de variância entre as duas metodologias de simulação física. Apesar do  $R^2$  não representar todo o conjunto de dados, a análise de variância (o p-valor obtido na análise de variância é bastante baixo, menor que 0,05) indica que as correlações obtidas apresentam bom caráter preditivo.

Tabela 5.2: Análise de variância da equação de regressão do consumo de combustível entre as duas metodologias de simulação física.

<i>Fonte</i>	<i>GL</i>	<i>SQ</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>
Regressão	1	171,1	171,1	21,62	0,002
Erro Residual	8	63,0	7,91	-	-
<b>Total</b>	9	234,4	-	-	-

➤ ***Produtividade de sinterização:***

A figura 5.31 mostra a correlação entre a metodologia de simulação física mini pot test e a metodologia sinter pot test para a variável: produtividade da sinterização.

### Correlação entre as metodologias de simulação - Produtividade

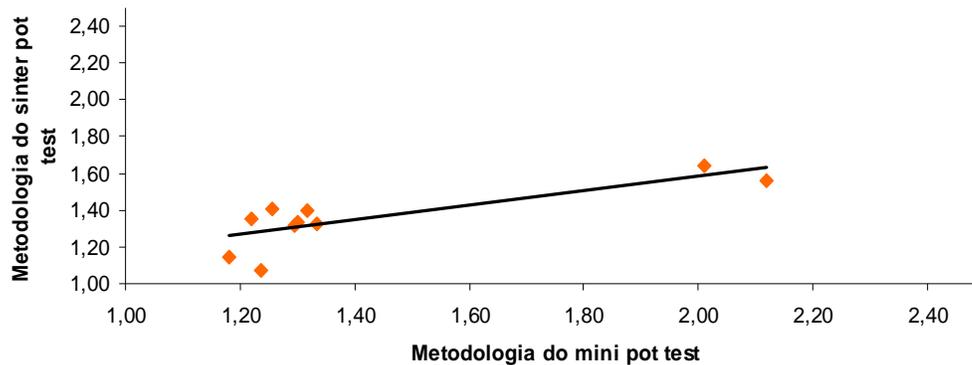


Figura 5.25: Correlação entre as metodologias de simulação física – Metodologia do mini pot test VS Metodologia do sinter pot test - Produtividade.

$$\text{Produtividade}_{\text{Sinter-pot}} = 0,77 + 0,41 \cdot \text{Produtividade}_{\text{Mini-pot}} \quad (5.2)$$

Os dados mostram correlação razoável da produtividade entre as duas metodologias abordadas. A equação (5.2) prevê a produtividade obtida pela aplicação da metodologia do sinter pot em função da produtividade determinada na metodologia do mini pot test. O  $R^2$  obtido a partir da correlação entre os consumos de combustível apresentou foi 70%. Este  $R^2$  indica que 70% dos dados apresentam comportamento semelhante quando submetidos às duas metodologias de simulação física, ou seja, a equação representa 70% dos dados.

A tabela 5.3 mostra a análise de variância da equação (5.2). Apesar do  $R^2$  não representar todo o conjunto de dados, a análise de variância (o p-valor obtido na análise de variância é bastante baixo, menor que 0,05). indica que as correlações obtidas apresentam bom caráter preditivo.

Tabela 5.3: Análise de variância da equação de regressão da produtividade da sinterização entre as duas metodologias de simulação física.

<i>Fonte</i>	<i>GL</i>	<i>SQ</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>
Regressão	1	0,1761	0,1761	18,22	0,003
Erro Residual	8	0,0773	0,0097	-	-
<b>Total</b>	9	0,2534	-	-	-

➤ *Índice de tamboramento do produto de sinterização:*

A figura 5.32 mostra a correlação entre a metodologia de simulação física mini pot test e a metodologia sinter pot test para a variável: índice de tamboramento do sinter.

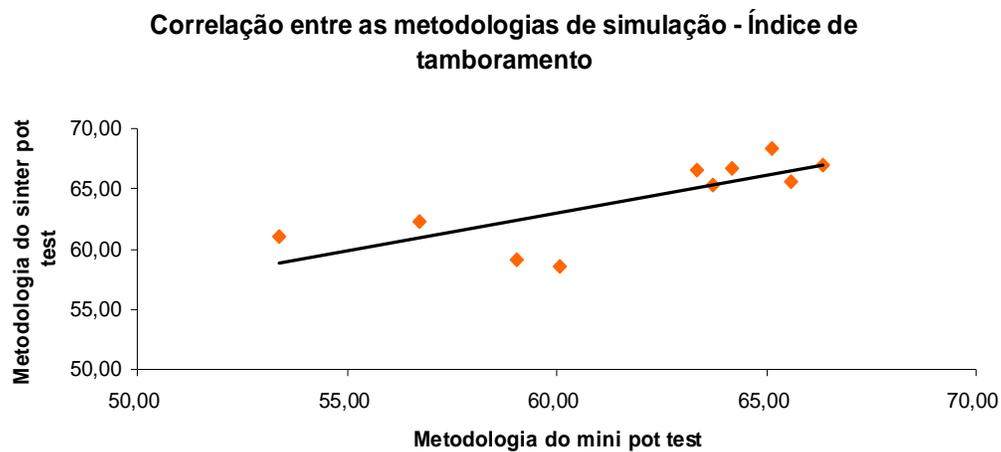


Figura 5.26: Correlação entre as metodologias de simulação física – Metodologia do mini pot test VS Metodologia do sinter pot test – Índice de tamboramento.

$$IT(+ 6,3 \text{ mm})_{\text{Sinter-pot}} = 25,13 + 0,63 \cdot IT(+ 5,0 \text{ mm})_{\text{Mini-pot}} \quad (5.3)$$

Os dados mostram baixa correlação do índice de tamboramento do produto de sinterização entre as duas metodologias abordadas. A equação (5.3) prevê o índice de tamboramento dos produtos de sinterização obtidos na aplicação da metodologia do sinter pot em função do índice obtido na metodologia do mini pot test.

O  $R^2$  obtido a partir da correlação entre os consumos de combustível apresentou foi 59%. Este  $R^2$  indica que apenas 59% dos dados apresentam comportamento semelhante quando submetidos às duas metodologias de simulação física, ou seja, a equação representa apenas 59% dos dados.

A tabela 5.4 mostra a análise de variância da equação (5.3). Apesar do baixo valor apresentado para  $R^2$ , o p-valor obtido na análise de variância é bastante baixo, menor que 0,05. A combinação do  $R^2$  e do p-valor valida a regressão proposta para a correlação do índice de tamboramento.

Tabela 5.4: Análise de variância da equação de regressão para o índice de tamboramento entre as duas metodologias de simulação física.

<i>Fonte</i>	<i>GL</i>	<i>SQ</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>
Regressão	1	65,36	65,36	11,31	0,01
Erro Residual	8	46,23	5,78	-	-
<b>Total</b>	9	111,58	-	-	-

Os estudos indicam consistência na previsibilidade de parâmetros de processo na aplicação da metodologia de menor escala mini pot test. Apesar de não apresentarem correlação próxima a 100% as equações desenvolvidas tanto para a produtividade da sinterização e quanto para o consumo de combustível podem ser usadas para prever o comportamento destas variáveis na aplicação da metodologia do sinter pot test a partir da simulação física das misturas sob a metodologia do mini pot test. De acordo com os ensaios comparativos feitos esta metodologia mostrou-se robusta e ajustada e capaz de reproduzir o comportamento do processo de sinterização.

Considerando-se que o consumo de amostra requerido pela metodologia do mini-pot test é apenas cerca de 20% do consumo da metodologia de maior escala a primeira metodologia consolida-se como um instrumento fundamental na pesquisa e conhecimento de análise de impactos no processo de sinterização devido a variações na composição ou mudança de qualidade da mistura de sinterização.

A realização de simulações sob as diretrizes da metodologia do mini pot test e a aplicação das correlações de processo desenvolvidas neste trabalho ajudará a ampliar o conhecimento em relação ao desempenho de diferentes misturas frente ao processo de sinterização, já que com um mesmo volume inicial de amostra simuladas no pote de menor escala permite um mapeamento mais amplo de um maior domínio de variações de misturas.

A metodologia do mini pot test apresenta deficiência na previsão de propriedades físicas e indicam falhas também na previsão da qualidade metalúrgica do produto formado. Isto pode ser confirmado pela baixa correlação obtida neste trabalho para a previsão do índice de tamboramento. Em torno de 50% apenas dos dados são representados pela equação.

Vale ressaltar que a boa previsibilidade das equações para os parâmetros de processo e a deficiência em relação a previsão da qualidade física do sinter provavelmente se deve ao foco dado aos ajustes dos parâmetros de processo. Os ensaios preliminares de ajuste de finos de retorno e obtenção da umidade ótima auxiliaram no ajuste dos parâmetros de processo. Apesar não ter sido avaliado no trabalho, acredita-se que a mudança de abordagem dos ensaios preliminares visando o ajuste da qualidade física do sinter poderia alterar parâmetros o ajuste dos parâmetros.

Assim, mesmo apresentando-se como boa substituta da metodologia do sinter pot test para na previsão do comportamento de parâmetros de processo, a metodologia do mini pot test apresenta fraquezas quanto na previsão de propriedades física e metalúrgica do sinter, não se apresentando como uma alternativa robusta na reprodução de impactos na qualidade do sinter. Assim, principalmente para a determinação de qualidade do sinter ainda a aplicação da metodologia do sinter pot test não deve ser dispensada.

## 6 Conclusões

O trabalho permitiu o aprofundamento do conhecimento e análise de parâmetros operacionais de uma metodologia de simulação física de sinterização em pequena escala (mini pot test) suprimindo informações a cerca das relações, semelhanças e limitações desta através de sua comparação com uma metodologia de maior escala (sinter pot test).

Através de ensaios de simulação física realizados sob as diretrizes das duas metodologias foi possível validar a metodologia de simulação física de pequena escala através da comparação entre os parâmetros de processo e produtos obtidos por variações na composição das matrizes de sinterização testadas. De acordo com os ensaios comparativos feitos esta metodologia mostrou-se robusta e ajustada e capaz de reproduzir o comportamento do processo de sinterização.

O caráter comparativo deste trabalho ajuda a preencher a deficiências na definição de limitações ou ganhos da utilização de uma metodologia em detrimento de outra, uma vez que a maioria dos trabalhos relacionados à simulação física de sinterização foca na descrição e avaliação de uma metodologia perante condições definidas. A obtenção de correlações entre duas diferentes metodologias permite a previsão do comportamento das misturas frente à sinterização a partir da realização de simulações físicas apenas sob a metodologia do mini pot test.

Considerando-se que o consumo de amostra requerido pela metodologia do mini-pot test é apenas cerca de 20% do consumo da metodologia de maior escala e a dificuldade na obtenção de amostras de misturas reais a primeira metodologia e as correlações obtidas a partir deste trabalho consolidam-se como um instrumento fundamental na pesquisa e ampliação do conhecimento e análise de impactos no processo de sinterização devido a variações na composição ou mudança de qualidade da mistura de sinterização. Com menor volume de amostra é possível através da aplicação da metodologia do mini pot test ampliar o mapeamento do impacto no processo de sinterização relativo à variações na composição e qualidade de misturas.

Para a avaliação e validação das metodologias de simulação física foram consideradas cinco misturas e os seguintes parâmetros de processo: tempo de sinterização, produtividade da sinterização, rendimento da sinterização e consumo de combustível da sinterização.

As misturas foram compostas a partir de amostras de minérios australianos, brasileiros indianos, africanos e chineses considerando práticas operacionais típicas de siderúrgicas chinesas, européias e japonesas.

As variáveis tempo de sinterização, consumo de combustível, velocidade da frente de queima, resistência a permeabilidade apresentaram comportamento semelhante nas simulações físicas das duas metodologias avaliadas.

A semelhança no comportamento destas variáveis durante as simulações da metodologia de pequeno porte, ainda pouco difundida, com as variáveis de processo de uma metodologia de simulação de maior escala fornece indícios favoráveis à validação do processo contemplado na primeira metodologia. Importante ressaltar que a semelhança nas variáveis de processo valida a metodologia do mini pot test apenas quanto a reprodução do processo. A validação quanto às propriedades físicas e metalúrgicas do produto produzido nas simulações físicas do mini pot test não pode ser atribuída ao comportamento do processo. A abordagem das propriedades do produto serão avaliadas a partir da análise dos produtos.

Quimicamente a metodologia do mini pot test mostrou-se capaz de reproduzir os produtos obtidos nos ensaios da metodologia do sinter pot test assim como se aproximou bastante da qualidade prevista por cálculos de balanço de massa desenvolvidos neste trabalho. Esta capacidade de reprodução química dos produtos de sinterização é outro fator que valida a aplicação da metodologia do mini pot test.

Mas os resultados mostram que esta metodologia apresenta falhas na previsão da qualidade física e indicam também deficiências na reprodução de qualidades metalúrgicas do sinter.

O mesmo comportamento é observado na definição das correlações. Os estudos indicam consistência na previsibilidade de parâmetros de processo na aplicação da metodologia de menor escala (mini pot test). Apesar de não representarem 100% dos dados as equações desenvolvidas tanto para a produtividade da sinterização e quanto para o consumo de combustível podem ser usadas para prever o comportamento destas variáveis na aplicação da metodologia do sinter pot test a partir da simulação física das misturas sob a metodologia do mini pot test.

Mas a metodologia do mini pot test apresenta deficiência na previsão de propriedades físicas e metalúrgica do produto formado. Isto pode ser confirmado pela baixa correlação obtida neste trabalho para a previsão do índice de tamboramento.

Assim, mesmo apresentando-se como boa substituta da metodologia do sinter pot test para na previsão do comportamento de parâmetros de processo, a metodologia do mini pot test apresenta fraquezas quanto na previsão de propriedades física e metalúrgica do sinter, não se apresentando como uma alternativa robusta na reprodução de impactos na qualidade do sinter. Assim, principalmente para a determinação de qualidade do sinter ainda a aplicação da metodologia do sinter pot test não deve ser dispensada.

## **7 Recomendações:**

Apesar de utilizar misturas com características mineralógicas e granulométricas diferentes, a quantidade de pontos considerados parece não ter sido suficientes para atingir os resultados desejados. Sugere-se que sejam compostas novas misturas visando reduzir as diferenças na composição química dos sínteres. Possibilitando aumentar a quantidade de ensaios de forma a melhorar as equações obtidas e garantir maior robustez em sua aplicação.

## 8 Referência Bibliográfica

1. KANG, L. Suk-Joong. *Sintering Processes*. In: *Suk-Joong L. Kang. Sintering*. cap. 1, pp 3-8, 2005.
2. OLEVSKY, E. A. *Theory of Sintering: from Discrete to Continuum*. *Materials Science and Engineering*. pp 41–100, 1998.
3. ARAUJO, L. A. *Manual de Siderurgia*. Editora arte e Ciência. V 1 , 1997.
4. KANG, L. Suk-Joong. *Initial Stage Sintering*. In: *Suk-Joong L. Kang. Sintering*. cap. 4, pp 3-8, 2005.
5. HOCKING, M. B. *Production of Iron and Steel*. *Handbook of Chemical Technology and Pollution Control*. Third Edition, pp 421-452, 2005.
6. BALL, D.F et al. *Agglomeration of ore*. *Heinemann Educational Books Likited Lodon*, 1973.
7. HINKLEY, J et al. *an Investigation of Pre-ignition Air Flow in Ferrous Sintering*. *International Journal of Mineral Processing*. v 42, pp 37-52, 1994.
8. NASSARALLA, C. L. *Iron Production*. In: *Encyclopedia of Materials. Science and Technology, Second Edition*. pp 4296-4301, 2001.
9. MITTERLERHNER, J et al. *Modeling and Simulation of Heat Front Propagation in the Iron Ore Sintering Process*. *ISIJ International*. v.44, n0.1, pp 11-20, 2004.
10. GEERDES, M. et al. *Práticas Modernas para Operação de Alto-Fornos*. pp 17-28, 2007.
11. CUMMING, M.J. e THURLBY J.A. *Developments in Modelling and Simulation of Iron Sintering*. *Ironmaking and Steelmaking*. v.17, n0.4, pp 245-253, 1990.
12. FILHO, Alfredo. *Preparação de Cargas para Alto-Fornos*. *Associação Brasileira de Metais*, 1979.
13. GONDIM, E. P. et al. *Manual de Treinamento – Processo de Sinterização. Ouro Branco: Gerdau Açominas; gerência da área de redução*, 2007.
14. VENKATARAMANA, R. et al. *Mathematical Modelling and Simulation of the Iron Ore Sintering Process*. *Tata Search*. pp 50-55, 1998.
15. KAPUR, P.C.et al. *An Auto Layering Model For the Granulation of Iron Ore Fines*. *Int. J. Miner. Process*. v 39, p 239-250, 1993.
16. KAPUR, P.C. *Particle Population Balance in Granulation of Iron Ores by an Auto-Layering Mode*. *Proc. Conf. on Mineral Processing: Recent Advances and Future Trends, Kanpur, India*. *Allied Publishers, New Delh.*, pp. 703-717, 1995.

17. VENKATARAMANA, R et al. *A combined Model for Granule Size Distribution and Cold Permeability in the Wet Stage of Iron Ore Sintering Process. International journal of mineral processing.* v 57. pp 43-58, 1999.
18. LITSTER, J.D. E .WATERS, A.G. *Influence of the Material Properties of Iron Ore Sinter Feed on Granulation Effectiveness. Powder Technology.* v 55, pp 141-151, 1988.
19. XUEWEI, L.V et al. *Kinetics of Water Absorption by the Bed of Iron Ore Particle During Granulation. Powder Technology.* v 204. pp 138-144, 2010.
20. KASAI, E. et al. *The Effect of Raw mixture properties on bed permeability during sintering. ISIJ International.* v.29, pp 33-42, 1989
21. LITSTER, J.D. E .WATERS, A.G. *Kinetics of Iron Ore Sinter Feed Granulation. Powder Technology.* v 62, pp 125-134, 1990
22. LITSTER, J.D. et al. *A model for predicting the size distribution of product from a granulating drum. ISIJ International.* V 26,pp. 1036-1044, 1986.
23. FURUI, T. et al. *Nippon Steel Tech. Rept. Overseas*, 1977.
24. HIDA. Y et al, *Effect of Mineralogical Properties of Iron Ore on its Assimilation with Lime. Tetsu-to-Haagané*, 1992.
25. ROLLER P.W. *BHP Tech. Bull* pp 26-44, 1982.
26. NAGANO, S. et al. *Characteristics of Sinter Feed and its Influence on Sintering. 4<sup>th</sup> Int. Symp. Agglomeration, Iron and Steel Soc., AIME, Warrendale, PA, USA.* pp. 191-202, 1985.
27. MIZUKAMI, S. et al. *ISIJ*, v 26, 1986.
28. CASTRO, L.F.A et al. *Princípios Básicos e Processos de Fabricação do Gusa ao Aço Líquido. Belo Horizonte*, pp 25-31, 1985.
29. COSTA. E et al. *Slag Formation in the Adhering Layer of Granules and Its Reaction with Nuclei in Iron Ore Sintering. ISIJ International.* v.35, n<sup>o</sup>.2, pp 138-147, 1995.
30. CAPORALLI, L et al. *The Concept of Iron Ore Sintering Reactivity. Santa Luzia Ironmaking Conference Proceedings.* 2002.
31. LI Hong-ge et al. *Melting Characteristics of Iron Ore Fine During Sintering Process. Journal of Iron and Steel Research, International.* v 18, n<sup>o</sup>.5, pp 11-15, 2011.

32. KASAI E. e SAITO F. *Differential Thermal Analysis of Assimilations and Melt-formation Phenomena in the Sintering Process of Iron Ores. ISIJ International*, v.36, n<sup>o</sup>.8, pp 1109-1111, 1996.
33. CAO Yong-guo et al. *Mixed State and High Effective Utilization of Pilbara Blending Iron Ore Powder. Journal of Iron and Steel Research, International*. v.18, n<sup>o</sup>.9, pp 01-05, 2011.
34. CLOUT, J.M.F et al. *Fundamental Investigations of Differences in Bonding Mechanisms in Iron Ore Sinter Formed from Magnetite Concentrates and Hematite ores. Powder Technology*. 130, pp 393-399, 2003.
35. HINKLEY, J. et al. *Voidage of Ferrous Sinter Beds: New Measurement Technique and Dependence on Feed Characteristics. International Journal of Mineral Processing*. v 41, pp 53-59, 1994.
36. WON YANG et al. *Modeling of Combustion and Heat Transfer in an Iron Ore Sintering Bed with Considerations of Multiple Solid Phases. ISIJ International* v.44, n<sup>o</sup>.3, pp 492-499, 2003.
37. NOGUEIRA, R. et al. *Correlação entre Volume de Escória e Parâmetros de Qualidade do Sínter Produto. XXXIII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas. Ouro Preto, 09-12 setembro 2003.*
38. DONSKOI, E. et al. *Mathematical Modelling and Optimisation of Iron Ore Sinter Properties. CSIRO Minerals*.
39. YOUNG, R.W. *Dynamic Mathematical Model of Sintering Process. Ironmaking and Steelmaking*. n<sup>o</sup>.6, pp 321-328, 1977.
40. SHIBATA, J. *Analysis of Sintering Process by the Mathematical Model. Mathl Comput. Modeling*. v.11, pp 956-961, 1988.
41. SHIBATA, J. et al. *Basic Simulation Model for System Control of The Dwight-Lloyd Sintering Process. ISIE*. pp 1438-1441, 1999.
42. GIRI B.K. e ROY G.G. *Mathematical Modeling of Iron Ore Sintering Process Using Genetic Algorithm. Ironmaking and Steelmaking*. v.39, n<sup>o</sup>.1, pp 59-66, 2012.
43. POSADA RODRIGUEZ M.J. et al, *Burn-Through point Modelization in Sintering Process. La Revue de Métallurgie-CIT*. pp 225-233, 2009.
44. PANYCHEV A.A e NIKONOVA A.P. *Use of Mathematical Model to Optimize Process Parameters in the Sintering of Mikhailovskii and Lebedinskii concentrates. Metallurgist*. v.524, n<sup>o</sup>.9-10, pp 544-551, 2008.

45. WON YANG et al. *Combustion Characteristics in an Iron Ore Sintering Bed – Evaluation of Fuel Substitution. Combustion and Flame.* v.145, pp 447-463, 2006.
46. WON YANG et al. *Effect of Fuel Characteristics on the Thermal Process in an Iron Ore Sintering Bed. JSME International Journal.* v.48, n<sup>o</sup>.2, pp 316-321, 2005.
47. MUNCHI, I E HUGUCHI, J. *Theoretical analysis on the Operation of sintering. Tetsu-to-Hagané.* V 56, pp 371-381, 1970.
48. PATISON, F et al. *Mathematical Modelling of Iron Ore Sintering Process. Ironmaking and Steelmaking.* V18, pp 89-95, 1991.
49. NATH, N.K et al. *Dynamic Process Modelling of Iron Ore Sintering. Steel Res.* V 68, pp 285-292, 1997.
50. RAMOS, M.V et al. *Numerical Simulation Model of the Iron Ore Sintering Process Directly Describing the Agglomeration Phenomenon of Granules in the Packed Bed. ISIJ International.* V 44, n<sup>o</sup>.3, pp 492-499, 2004.
51. WON YANG et al. *Mathematical Model of Thermal Processes in an Iron Ore Sintering Bed. Metals and Materials International.* v.10, n<sup>o</sup>.5, pp 493-500, 2004.
52. CASTRO, J.A et al. *Analysis by Multiphase Multicomponent Model of Iron Ore Sintering Based on Alternative Steelworks Gaseous Fuels, Ironmaking and Steelmaking.* v.0, n<sup>o</sup>.0, pp 1-9, 2012
53. VOICE, E.W. *The permeability of Sinter Feeds. JISI.* v175, pp 97-152, 1953.
54. UMEKAGE, T. e YUU, S. *Numerical Simulation of Particle Agglomeration and Bed Shrink in Sintering Process. ISIJ International.* v.49, n<sup>o</sup>5, pp 693-702, 2009
55. LOO, C.E et al. *Influence of Material Properties on High-Temperature Zone Reactions In Sintering of Iron Ore. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section C- Mineral Processing And Extrative Metallurgy.* C7-C16, 1992.
56. HSIEH, L.H. *Effect of Raw Material Composition os Sintering Propoerties. ISIJ International.* v.45, n<sup>o</sup>4, pp 551-559, 2004v 45 n 4 p,2005
57. MATSUNO, F. et al. *Changes of Mineral Phases During the Sintering of Iron Ore Lime Stone Systems. ISIJ.* 1981.
58. RAVAT, Y. F. et al. *Laboratory Studies on the Effect of Some Operational Variables on Sinter Production. Tisco.* pp 51-61, 1979.

59. LOO, C. E. et al. *Fundamental Factors Determining Laboratory Sintering Results. ISIJ International*. v.45, n<sup>o</sup>4, pp 449-458, 2004

## 9 Anexo 1

Tabela 9.1: Análise química dos minérios disponíveis para a composição das misturas de sinterização.

<i>Análise química dos minérios</i>									
Minérios	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	PPC	+6.3mm	-6.3+1.0mm	-1.0+0,25mm	Fino
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
CHI1	66,5	7,1	0,3	27,7	0,9	0,00	0,00	0,4	99,6
CHI2	61,8	2,4	1,7	16,6	1,1	0,00	0,5	4,4	95,1
CHI3	64,0	10,1	0,9	17,2	0,6	0,00	0,1	1,0	98,9
CHI4	57,7	12,8	0,3	1,7	0,2	0,00	0,4	5,0	94,6
CHI5	64,7	5,3	0,7	26,0	2,1	0,00	0,1	3,3	96,6
CHI6	63,2	3,4	1,6	19,1	2,1	0,00	0,00	0,8	99,2
CHI7	68,3	3,8	0,1	21,5	0,4	0,00	0,1	0,5	99,4
CHI8	67,2	4,5	0,1	27,8	1,2	0,00	0,0	0,0	100,0
CHI9	54,6	9,5	0,4	15,2	1,8	0,00	6,4	40,2	53,4
AUS1	57,7	5,3	1,8	0,4	9,8	33,0	49,6	14,4	3,0
AUS2	58,0	5,4	2,3	0,5	8,2	27,0	53,1	10,7	9,5
AUS3	61,7	3,6	2,1	0,5	4,5	9,0	51,5	19,7	19,8
AUS4	61,5	3,9	2,0	0,3	5,1	21,0	45,6	14,7	18,9
AUS5	62,2	4,4	2,2	0,3	3,6	6,0	39,0	22,7	32,3
AUS6	58,6	4,4	1,4	0,3	8,9	59,5	35,4	1,5	3,8
IND1	63,0	4,9	2,6	0,6	0,1	22,5	24,9	11,0	41,6
IND2	61,3	5,6	2,6	0,6	3,5	9,7	34,8	24,7	30,8
AFR1	65,2	4,3	1,1	-	0,6	0,5	78,8	12,1	8,7
BRA1	65,0	1,7	1,7	0,1	2,1	0,1	0,9	5,1	94,0
BRA2	66,9	1,9	1,0	1,1	0,6	0,0	0,0	0,0	100,0
BRA3	65,8	1,4	1,8	0,3	1,1	12,7	37,1	23,9	26,0
BRA4	65,4	3,7	1,3	0,1	1,4	10,8	42,1	16,0	31,1
<b>BRA5</b>	64,9	4,7	0,7	0,4	1,7	9,9	40,6	18,9	30,7

Tabela 9.2: Qualidade química dos aditivos e do combustível utilizado na composição das misturas.

	<i>Fe</i>	<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>CaO</i>	<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>MgO</i>	<b>P.F</b>
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
Calcário calcítico	0,0	0,91	60,38	0,22	0,61	37,47
Serpentinito	5,02	38,19	1,40	0,98	37,29	13,72
Quartzito		95,0	0,60	0,40		
Dolomita	0,85	37,6	0,23	21,20		39,93
Cal Virgem		0,83	74,51	0,18	1,38	22,53
<b>Combustível</b>	4,40	8,57	1,18	4,70	0,52	77,06

Tabela 9.3: Qualidade dos produtos de sinterização obtidos pelo cálculo de balanço de massa e nas simulações física das metodologia do sinter pot test e do mini pot test.

	<i>Fe</i>			<i>SiO<sub>2</sub></i>			<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>			<i>MgO</i>			<b>B<sub>2</sub></b>		
	BM	PT	MPT	BM	PT	MPT	BM	PT	MPT	BM	PT	MPT	BM	PT	MPT
Mistura A	58,7	58,6	59,4	3,2	3,2	3,6	1,6	1,1	1,0	1,5	1,5	1,6	3,0	2,9	2,7
Mistura B	58,1	58,7	58,4	5,2	5,0	5,3	0,8	1,7	1,7	1,5	0,9	1,3	1,9	1,8	1,8
Mistura C	58,3	59,3	58,1	4,8	4,8	4,9	1,9	1,5	1,6	1,5	1,1	1,6	1,9	1,8	1,8
Mistura D	53,3	55,4	55,0	7,7	6,6	6,9	1,4	1,5	1,5	1,5	1,2	1,3	1,7	1,7	1,7
<b>Mistura E</b>	54,0	54,7	54,6	7,2	6,6	6,7	1,7	2,0	1,9	1,5	1,3	1,3	1,7	1,7	1,8

Tabela 9.4: Variáveis de processo de sinterização das misturas sob diretrizes da metodologia do sinter pot test e sob a metodologia do mini pot test.

	<i>Produtividade</i> (t/m <sup>2</sup> /24h)		<i>Consumo de combustível</i>		<i>Tempo de snterização</i>		<i>Rendimento</i> (%)		<b>Índice de tamboramento</b>	
	PT	MPT	PT	MPT	PT	MPT	PT	MPT	PT	MPT
Mistura A	38,42	49,52	61,34	80,39	22,60	13,61	68,98	65,85	65,93	52,80
Mistura B	32,83	30,68	60,46	82,20	26,57	22,79	68,17	66,41	61,62	43,80
Mistura C	32,73	31,82	70,72	85,95	22,49	20,40	65,78	66,38	58,83	50,40
Mistura D	26,64	29,01	72,25	89,53	27,83	21,58	65,83	65,73	66,13	52,80
<b>Mistura E</b>	32,03	30,19	64,82	83,73	25,27	21,90	67,29	65,04	67,67	54,53

BM = Balanço de massa

PT= Metodologia de simulação sinter pot test

MPT= Metodologia de simulação mini pot test

Tabela 9.5: Composição das misturas de sinterização.

Misturas	Composição das misturas	Participação (%)	<i>Metodologia do pot piloto</i>		<i>Metodologia do mini pot piloto</i>	
			Massa seca (kg)	Massa úmida (kg)	Massa seca (kg)	Massa úmida (kg)
Mistura A	CHI 2	2,78	0,83	0,85	0,28	0,28
	AUS 3	5,55	1,67	1,73	0,56	0,58
	AUS 5	5,55	1,67	1,69	0,56	0,56
	AFR 1	8,33	2,50	2,53	0,83	0,84
	BRA 3	22,76	6,83	7,17	2,28	2,39
	BRA 4	10,55	3,16	3,32	1,05	1,11
	Calcário Calcítico	3,98	1,19	1,20	0,40	0,40
	Dolomita	3,51	1,05	1,06	0,35	0,35
	Cal Virgem	3,00	0,90	0,90	0,30	0,30
	Combustível	4,00	1,20	1,21	0,40	0,40
	Finos de retorno	30,00	9,00	9,00	3,00	3,00
	Total	100,00	30,00	30,67	10,00	10,22
Mistura B	CHI 1	13,85	4,43	4,78	1,38	1,49
	CHI 5	13,85	4,43	4,55	1,38	1,41
	CHI 7	16,62	5,32	5,47	1,66	1,70
	AUS 6	11,08	3,55	3,64	1,11	1,14
	Calcário Calcítico	4,03	1,29	1,29	0,40	0,40
	Dolomita	3,57	1,14	1,15	0,36	0,36
	Cal Virgem	3,00	0,96	0,96	0,30	0,30
	Combustível	4,00	1,28	1,28	0,40	0,40
	Finos de retorno	30,00	9,60	9,60	3,00	3,00
	Total	100,00	32,00	32,72	10,00	10,21
Mistura C	AUS 1	8,51	2,72	2,95	0,85	0,92
	AUS 2	11,35	3,63	3,87	1,14	1,21
	AUS 3	14,19	4,54	4,72	1,42	1,47
	CHI 6	5,68	1,82	1,95	0,57	0,61

Mistura D	CHI 8	17,03	5,45	5,71	1,70	1,78
	Calcário Calcítico	3,72	1,19	1,19	0,37	0,37
	Dolomita	2,53	0,81	0,82	0,25	0,26
	Cal Virgem	3,00	0,96	0,96	0,30	0,30
	Combustível	4,00	1,28	1,28	0,40	0,40
	Finos de retorno	30,00	9,60	9,60	3,00	3,00
	Total	100,00	32,00	33,05	10,00	10,32
	AUS 1	5,43	1,74	1,86	0,54	0,59
	AUS 2	10,85	3,47	3,68	1,09	1,15
	CHI 3	10,85	3,47	3,80	1,09	1,19
	CHI 4	5,43	1,74	1,89	0,54	0,59
	CHI 9	10,85	3,47	3,60	1,09	1,12
	AUS 6	10,85	3,47	3,56	1,09	1,11
	Calcário Calcítico	5,63	1,80	1,81	0,56	0,57
	Dolomita	3,09	0,99	1,03	0,31	0,31
	Cal Virgem	3,00	0,96	0,96	0,30	0,30
Combustível	4,00	1,28	1,28	0,40	0,40	
Finos de retorno	30,00	9,60	9,60	3,00	3,00	
Total	100,00	32,00	33,07	10,00	10,34	
Mistura E	CHI 1	10,70	3,42	3,69	1,07	1,15
	IND 1	13,37	4,28	4,38	1,34	1,38
	CHI 4	13,37	4,28	4,64	1,34	1,46
	IND 2	16,05	5,14	5,24	1,60	1,63
	Calcário Calcítico	6,78	2,17	2,18	0,68	0,68
	Dolomita	2,73	0,87	0,88	0,27	0,28
	Cal Virgem	3,00	0,96	0,96	0,30	0,30
	Combustível	4,00	1,28	1,28	0,40	0,40
	Finos de retorno	30,00	9,60	9,60	3,00	3,00
	Total					