

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

“Modelo Termodinâmico para Cálculo de Valor em Uso no Processo de Sinterização de
Minério de Ferro”

Autor: Bruno Cezar Evaristo Pereira
Orientador: Prof^o Luiz Fernando Andrade de Castro
Co Orientador: Maycon Athayde

Março 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Bruno Cezar Evaristo Pereira

Modelo Termodinâmico para Cálculo de Valor em Uso no Processo de Sinterização de
Minério de Ferro.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa

Orientador: Luiz Fernando Andrade de Castro

Coorientador: Maycon Athayde

Belo Horizonte

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

2017

DEDICATÓRIA

A minha família que sempre foi, e será, o pilar principal de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer às seguintes pessoas e instituições:

Primeiramente a Deus e Nossa Senhora de Lourdes, por me dar coragem, força e saúde para vencer mais essa etapa em minha vida;

À minha família e em especial aos meus pais, pelo total apoio em toda minha vida e por ser o grande pilar de força, superação que tenho;

À SAMARCO MINERAÇÃO S.A, pela oportunidade de desenvolvimento e realização desse trabalho;

Ao Professor Luiz Fernando Andrade de Castro, pelas orientações não só no trabalho, mas em todo período que fui aluno desde a graduação, além da amizade construída;

Ao Professor Antonio Eduardo Clark Peres, pela orientação e pela amizade construída ao longo do curso;

Ao grande amigo Otaviano, que me passou a demanda deste trabalho e sempre incentivou na evolução e propagação do conhecimento;

Ao grande amigo Maycon Athaide, por me acompanhar desde o início na execução e orientação do trabalho desenvolvido e na grande ajuda na busca de referências bibliográficas;

À eterna amiga Tatiana Silva que sempre me apoiou em todas as decisões e foi grande responsável por mudanças positivas em minha personalidade;

À PEDRAS CONGONHAS Ltda, pelo apoio e compreensão na execução do trabalho;

À CAPES e ao Departamento de Metalurgia por todo apoio e orientação em minha formação profissional.

SUMÁRIO

1. – Introdução	1
2. - Objetivo	3
3. – Revisão Bibliográfica	4
3.1 - Descrições do processo	5
3.2 - Zonas de Sinterização	7
3.3 - Principais Reações do Processo	9
3.4 - Matérias-primas empregadas na produção de sínter	11
3.4.1 – Fundentes.....	12
3.4.2 – Combustível.....	13
3.4.3 - Minério de ferro	14
3.5 - Permeabilidade no leito.....	18
3.5.1 – Cálculo dos espaços vazios.....	22
3.5.2 – Consumo Energético.....	22
3.6 – Formação do FeO	24
3.7 – Mecanismos atuais para precificação do minério de ferro	26
3.8 – Conceito de Valor em Uso	28
3.8.1 - Valor em Uso aplicado ao desenvolvimento de produtos	30
3.9 - Modelagem computacional no processo de sinterização	31
4. – Metodologia	33
4.1 - Modelagem Computacional	34
5.0 – Resultados e Discussões	35
5.1 – Desenvolvimento do Modelo	35
5.2 - Fluxo Estrutural do Modelo	37
5.2.1 - Balanço de Massa.....	37
5.2.2 Balanço de Energia.....	40
5.2.3 – Estimativa do Cálculo do Consumo Energético	46

5.3 – Validação do Modelo	49
5.4 – Estudo de Caso	51
6. – Conclusões	60
7.0 – Sugestões para Trabalhos Futuros	61
8.0 – Referências Bibliográficas	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.0 - Tendência da degradação química nas principais minas de minério de ferro no mundo.....	2
Figura 1.1 - Tendência da produção mundial de sinter feed.....	2
Figura 3.0 - Fluxo de Produção de aço.....	4
Figura 3.1 - Resumo Processo de Sinterização.....	6
Figura 3.2 - Corte longitudinal, transversal e perfil térmico de um leito de sinterização em um instante qualquer.....	8
Figura 3.3 - Evolução dos fenômenos químicos e físicos no leito.....	9
Figura 3.4 - Principais reações do processo dividido por zona.....	11
Figura 3.5 - Influência do MgO na qualidade física do sinter.....	15
Figura 3.6 - Distribuição granulométrica ideal para mistura de minérios.....	17
Figura 3.7 - Ignição e movimentação da frente de combustão durante a sinterização....	19
Figura 3.8 - Resultados da queda de pressão x velocidade superficial do gás para cada amostra estudada.....	21
Figura 3.9 - Efeito da umidade na quantidade de vazios e no diâmetro médio.....	22
Figura 3.10 - Influência do MgO na formação de FeO no sinter.....	25

Figura 3.11 - Cálculo para precificação de finos de minério de ferro no modelo trimestral.....	26
Figura 3.12 - Histórico de preços de minério de ferro.....	27
Figura 3.13 - Conceito de valor em uso.....	30
Figura 4.0 - Estrutura macro de funcionamento do modelo proposto.....	34
Figura 4.1 - Representação simplificada do processo de modelagem.....	34
Figura 5.0 - Qualidade de entrada dos minérios e fundentes.....	38
Figura 5.1 - Influência do MgO na formação de FeO no sínter.....	40
Figura 5.2 - Variação do consumo de carbono versus energia necessária para ignição.....	43
Figura 5.3 - Interface de entrada das fontes de energia no modelo.....	44
Figura 5.4 - Rotina de cálculo para estimativa do consumo energético influenciado pela granulometria alimentada.....	47
Figura 5.5 - Variação do consumo energético com o diâmetro médio alimentado.....	48
Figura 6.0 - Índice de preço atual do minério de ferro (fino).....	52
Figura 6.1 - Análise Química da carga metálica utilizada no estudo de caso.....	53
Figura 6.2 - Cenários para estudo de caso.....	53
Figura 6.3 - Gráficos dos principais resultados dos cenários discutidos.....	57

Figura 6.4 - Qualidade química dos minérios utilizados no cálculo do ponto de equilíbrio do minério.....58

Figura 6.5 - Ponto de equilíbrio da utilização de um minério de baixo teor de ferro.....59

Figura 6.6 - Ponto de equilíbrio do preço máximo a ser pago em um minério na situação proposta.....60

LISTA DE TABELAS

Tabela V.1 - Dados dos coeficientes de entalpia e massas molares. (Dados Termodinâmicos).....	41
Tabela VI.1 - Comparação entre os dados do modelo os dados informados pelos operadores de sínter.....	50
Tabela VI.2 - Relatório de valor em uso com o resultado dos cenários analisados.....	54
Tabela VI.3 - Qualidade química produzida nos 5 diferentes cenários do estudo de caso A.....	55
Tabela VI.4 - Cenários para cálculo do ponto de equilíbrio.....	58

RESUMO

O processo de sinterização possui grande importância na rota de produção Alto-Forno por ser responsável pela produção de aproximadamente 60% da carga metálica desse reator. A qualidade química e granulométrica ofertada pelas minerações no mundo vem diminuindo devido a uma condição natural das Minas, forçando as siderúrgicas a reduzir produtividade e/ou adequar o processo ou a qualidade do produto final à nova realizada. Além disso, o cenário atual da siderurgia mundial está “forçando” cada vez mais a maximização do uso de matérias primas.

Como forma de avaliar as diferenças existentes entre dois produtos com foco no resultado oferecido em termos de “ganho” no processo, a diferenciação torna-se algo extremamente importante no mundo dos negócios e ocorre inevitavelmente e intencionalmente a todo o instante, até mesmo para aqueles produtos e serviços com menor grau de diferenciação.

O presente trabalho apresenta uma ferramenta para análise técnica econômica rotineira do valor em uso da carga metálica em uma sinterização de minério de ferro para apoio técnico comercial em negociações de preço final do minério de ferro. Tal ferramenta permite realizar, de forma comparativa, o impacto da qualidade química e granulométrica dos finos de minério de ferro no custo final de produção destacando-se os principais itens de custo variável. A ferramenta tem como base um modelo de característica híbrida compreendendo um balanço de massa acoplado a um balanço térmico além de relações matemáticas que expliquem o impacto da granulometria no consumo energético final.

A metodologia de cálculo do valor em uso pode ser utilizada tanto pelas siderúrgicas na aquisição do minério quanto pelas minerações, possibilitando a valorização de pontos específicos da qualidade do seu produto no processo produtivo do cliente, como forma de um reconhecimento, prêmio ou diferenciação de preço durante a rodada de negociações, para um maior estímulo ao fornecimento de determinadas especificações

de sinter, que, por ventura, possam resultar em um superior desempenho no cliente, com ganhos reais, em termos de produtividade e/ou de redução de custo.

ABSTRACT

The sintering process has a great importance in the Blast Furnace production route. It is responsible for the production of about 60% of the metallic charge of this reactor. The chemical and granulometric quality offered by the iron ore mine in the world has been decreasing, due to a natural condition of the mine, forcing steelmakers to reduce productivity and/or adapt the process or quality of the final product to the new one.

In order to evaluate the differences between two products focusing on the outcome offered in terms of process "gain", the differentiation becomes extremely important in the business world and occurs inevitably and intentionally at all times, even for those products and services with less differentiation.

The present work introduces a mathematical tool for the economic analysis of the value in use of the metallic charge in iron ore sintering process for commercial and technical support in the final price negotiations for iron ore. This tool allows comparative analysis of the chemical and granulometric quality impact of the iron ore fines in the final cost of production, highlighting the main variable cost items. The tool is based on a hybrid characteristic model comprising a mass balance coupled to a thermal balance in addition to mathematical relationships to explain the impact of grain size on the final energy consumption.

The value-in-use methodology can be used by both the steelmakers in the iron ore acquisition, and the mining enabling the specific points appreciation of the product quality in the customer's production process, as a recognizer way through premium or price differentiation during the negotiations, stimulating the supply of a sinter feed specification which can provide a superior performance in the customer process with real gains in terms of productivity and / or cost reduction.

1. – Introdução

No atual cenário econômico mundial, a siderurgia vem passando por momentos complicados que exigem, cada vez mais, maior rendimento operacional com menor custo. Consequentemente, a indústria de mineração é impactada diretamente, exercendo forte pressão no aumento de preço da principal matéria prima, o minério de ferro. Em particular, a mudança no cenário mundial da qualidade do minério de ferro vem impactando de forma negativa o uso pleno da capacidade instalada. Isto se deve principalmente à qualidade química e granulométrica ofertada pelas minerações no mundo que, devido a uma condição natural da Mina, vem forçando as siderúrgicas a reduzir produtividade e/ou adequar o processo ou a qualidade do produto final à nova realizada.

Quando a palavra de ordem é aumentar da produtividade, a melhoria da eficiência operacional se dá, por exemplo, através de investimentos, da adoção de melhores práticas operacionais e de manutenção, ou a partir da utilização de matérias-primas de qualidade superior.

Dentro desse contexto, o processo de sinterização possui extrema importância para uma usina integrada. Atualmente, a carga metálica de um alto-forno é composta por aproximadamente 60%, em média, de sínter. Isso torna o processo de sinterização alvo de constantes estudos objetivando sempre ganho de produtividade e efetividade operacional. Adicionalmente, estudos técnico-econômicos do processo sempre são realizados paralelamente a todos os outros.

Além da $\%SiO_2$ e Al_2O_3 que vem aumentando de forma considerável nas principais minas do mundo (figura 1.0), contribuindo para o aumento da escória no processo subsequente, a participação dos finos de minério na rota de produção vem aumentando de forma considerável (figura 1.1).

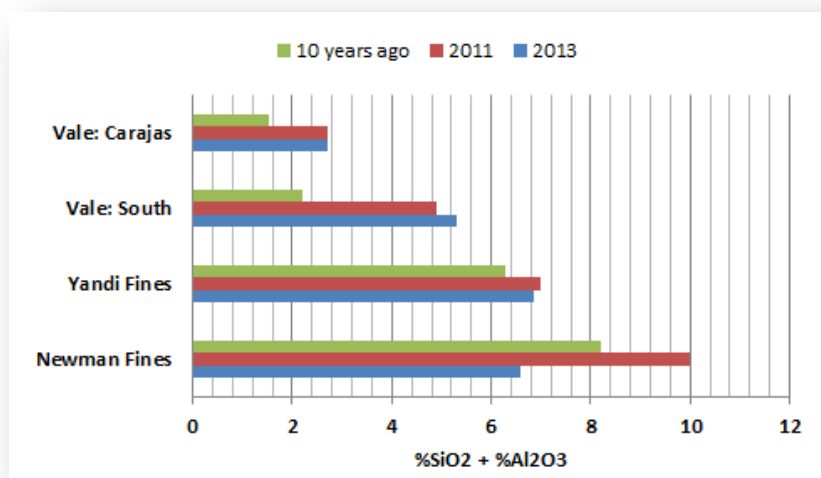


Figura 1.0 - Tendência da degradação química nas principais minas de minério de ferro no mundo ⁽¹⁾.

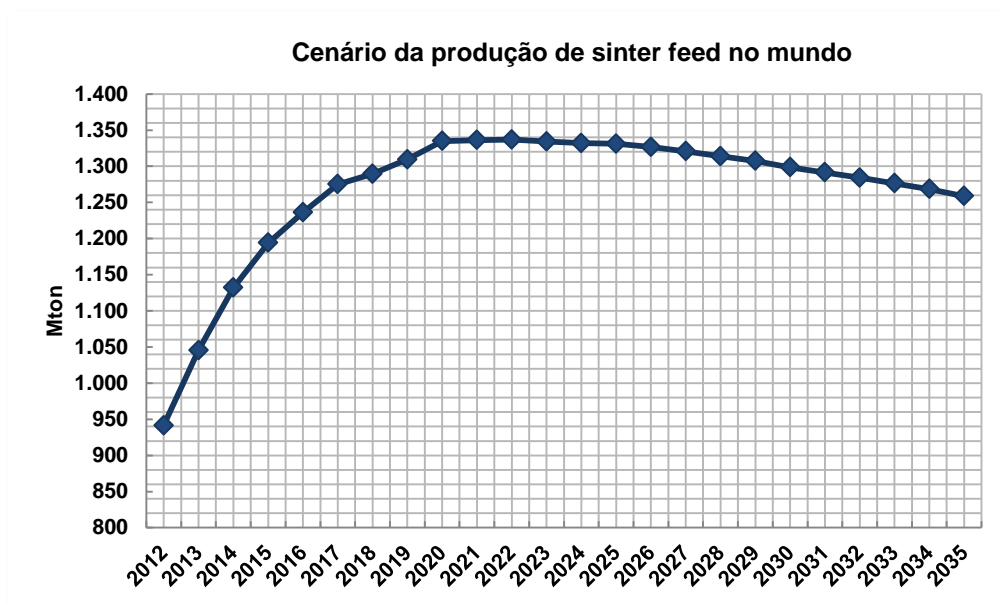


Figura 1.1 - Tendência da produção mundial de sinter feed ⁽²⁾.

Na busca da manutenção da competitividade do processo, a queda da qualidade fornecida vem demandando dos operadores de sinterização soluções de matérias-primas com composição química e granulometria adequada e custos de aquisição compatíveis.

2. - Objetivo

Este trabalho visa desenvolver um modelo híbrido do processo de sinterização, de natureza termoquímica e semi-empírico com o objetivo de mensurar o Valor em Uso, adicionado ou subtraído, pela utilização de diferentes matérias-primas.

3. – Revisão Bibliográfica

O processo de sinterização atua em duas frentes de extrema importância na cadeia de produção do aço. A primeira sendo, atualmente, fornecedor da principal matéria-prima fonte metálica para o alto-forno assumindo, dessa maneira, papel preponderante no desempenho operacional do processo. A segunda se posicionando de maneira atuante no cenário ambiental por utilizar várias matérias-primas consideradas como rejeito em processos paralelos. A etapa de sinterização do minério de ferro faz parte da área de preparação da carga para a redução em uma usina siderúrgica integrada (Figura 3.0).

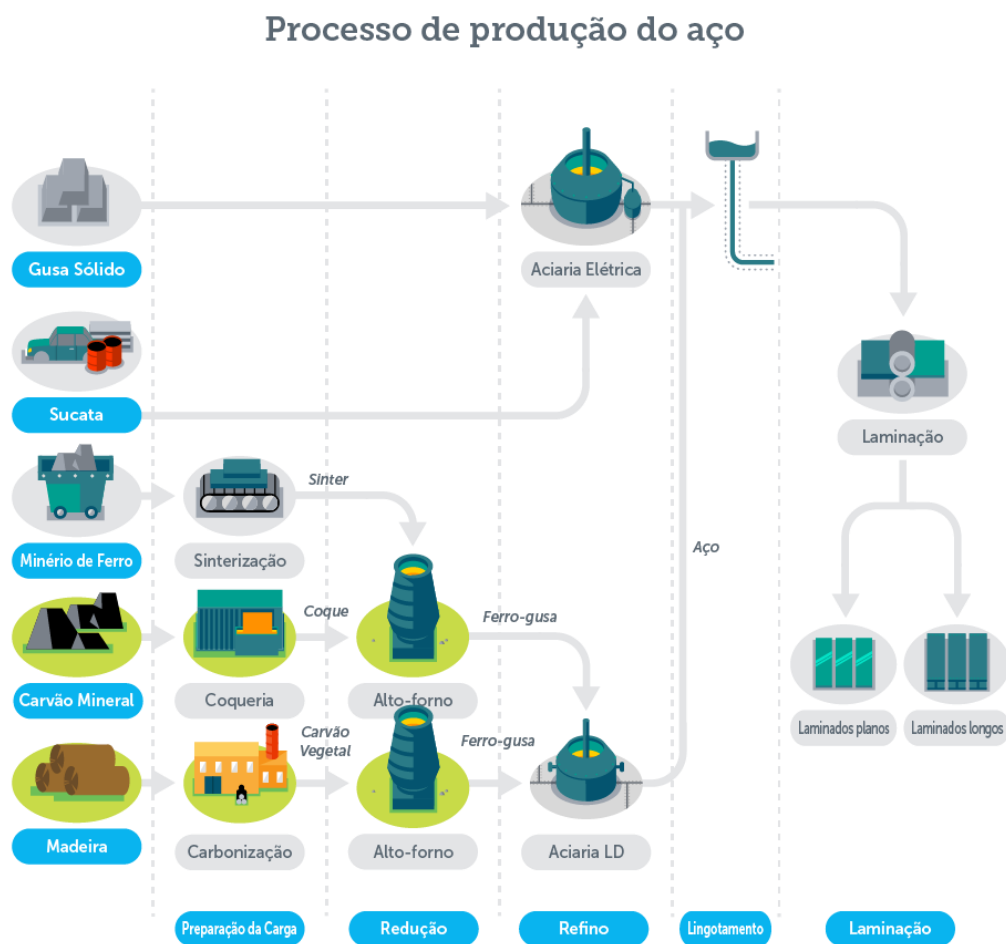


Figura 3.0 - Fluxo de Produção de aço ⁽³⁾.

3.1 - Descrições do processo

A sinterização do minério de ferro é um processo em contracorrente de componentes gasosos e sólidos com o objetivo de aglomerar finos de minério de ferro sob condições termoquímicas controladas. Consiste basicamente em misturar os finos de minério de ferro, fundentes, combustíveis sólidos e resíduos siderúrgicos sendo a mistura resultante alimentada em uma grelha móvel permeável. Além de aglomerar, a sinterização visa aumentar o tamanho físico das fontes de minério de ferro para formar um aglomerado de alta porosidade e, conseqüentemente, boa redutibilidade.

O processo de sinterização se inicia com a mistura em proporções definidas (de acordo com a qualidade final objetivada) 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 o “blend” é misturado em um tambor rotativo de forma a se obter uma mistura homogênea das matérias-primas. Após a homogeneização adiciona-se água à mistura propiciando a formação de grânulos que são enviados ao forno de sinterização.

A máquina de sinterização possui uma grelha móvel e no fundo desta grelha existe um sistema de exaustão que succiona o ar através do leito de mistura ⁽⁴⁾. A mistura granulada é então depositada sobre a grelha móvel em camadas de 400 a 900 mm de altura (figura 3.1).

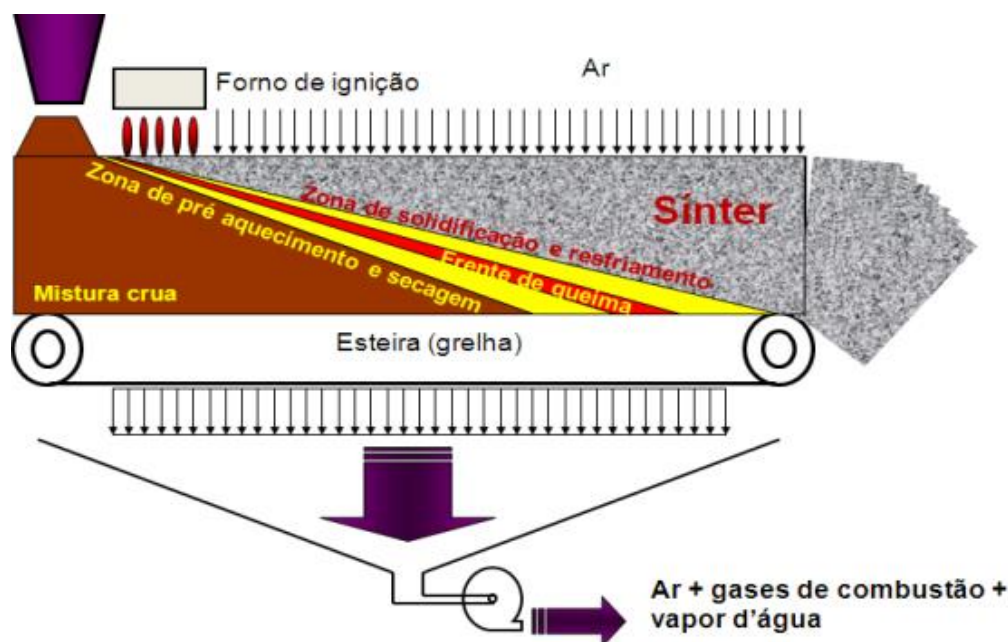


Figura 3.1 - Resumo Processo de Sinterização ⁽⁴⁾.

A mistura segue pelo leito e, ao mesmo tempo, o ar é sugado na parte de baixo da carga. A temperatura 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, basicamente, com a ignição da camada superior da mistura colocada sobre a grelha atingindo temperaturas máximas de 1.400°C. Uma vez iniciada a ignição, a combustão prossegue à medida que o ar entra em contato com as partículas de coque ou carvão vegetal, formando uma frente de combustão ou frente de chama. Essa frente cria um perfil de calor e temperatura dentro do forno fazendo com que os finos se aglomerem. Os combustíveis presentes na mistura de sinterização se encarregam de gerar calor necessário para fundir parcialmente a escória e aglomerar as partículas de minério.

A passagem do ar pelo leito provoca o deslocamento da frente de queima sendo assim definido o perfil de temperatura ⁽⁵⁾. A combustão localizada provoca uma fusão parcial da carga na região mais quente e o gás gerado na combustão pré-aquece a carga logo abaixo. Trata-se, portanto, de um processo com bom rendimento térmico, mas que depende de um bom controle de permeabilidade da carga ⁽⁶⁾.

3.2 - Zonas de Sinterização

Assim como outros processos produtivos, o processo de sinterização pode ser dividido em etapas ou, mais apropriado a esse caso, zonas principais:

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

Na figura 3.2 é possível observar a localização de cada zona assim como um perfil simplificado de temperatura ao longo do leito.

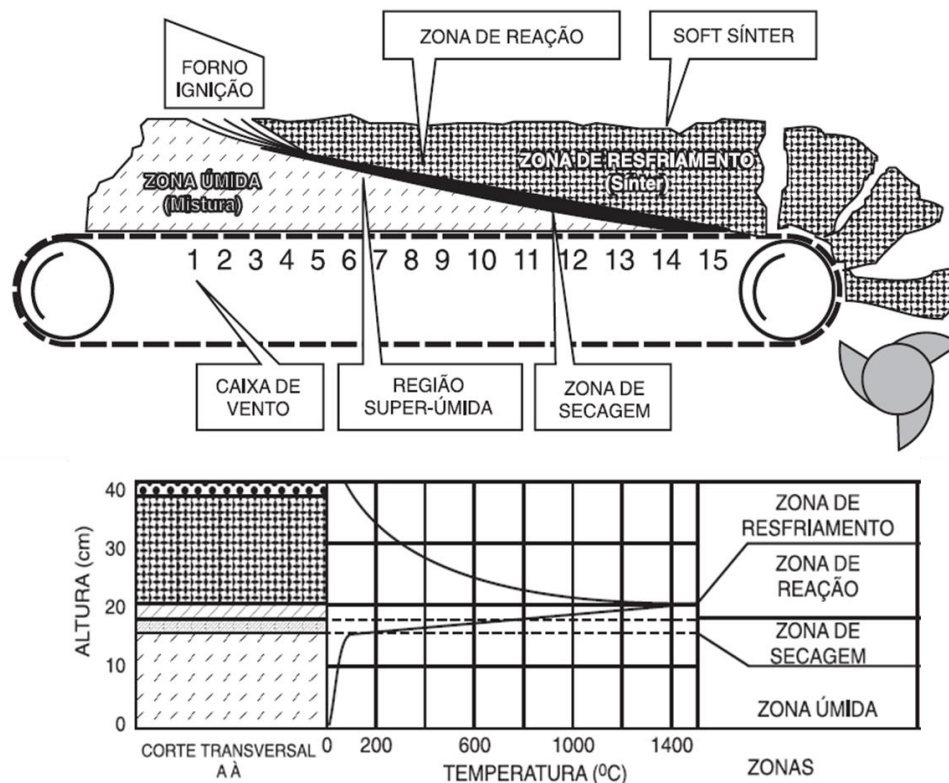


Figura 3.2 – Corte longitudinal, transversal e perfil térmico de um leito de sinterização em um instante qualquer ⁽⁸⁾.

Basicamente dois fenômenos distintos ocorrem no processo de sinterização, distribuídos através das zonas citadas anteriormente: o fenômeno físico e o químico.

O fenômeno físico tem como característica principal a transferência de calor que ocorre da parte superior à inferior do leito ocasionado pela sucção do ar pelos ventiladores de processo. Já o fenômeno químico é baseado na combustão do coque contido na mistura que cria uma fonte de calor responsável pelas reações químicas cuja evolução dependerá da reatividade, da qualidade química e granulométrica da mistura além da qualidade do combustível.

Importante salientar que os dois fenômenos trabalham de forma dependente entre si criando zonas termoquímicas no leito da qual denominamos de “zonas de sinterização”.

A figura 3.3 mostra como os dois fenômenos ocorrem durante o processo.

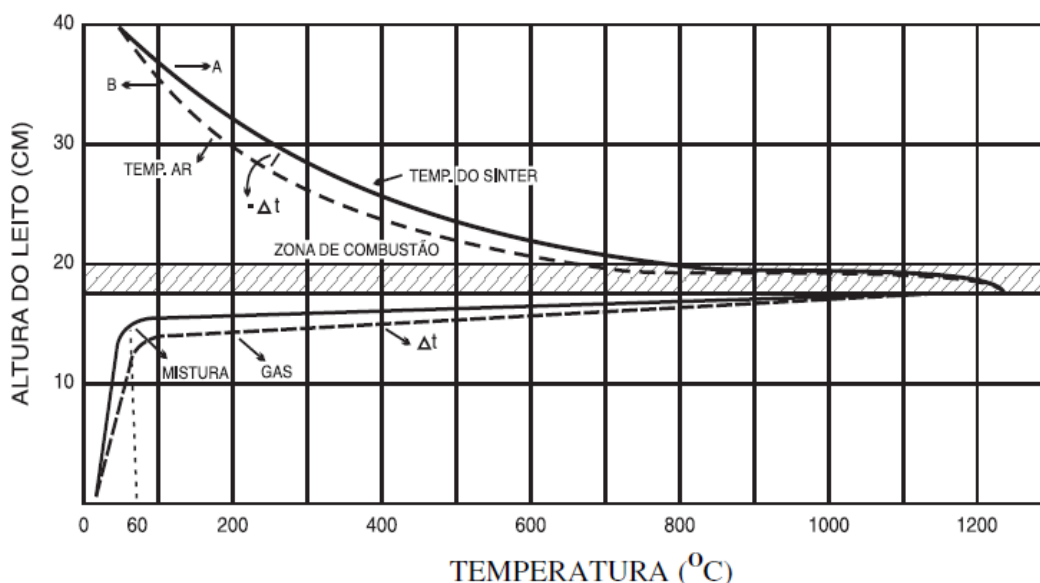


Figura 3.3 – Evolução dos fenômenos químicos e físicos no leito ⁽⁸⁾.

Na zona de combustão, região sombreada do gráfico, ocorre praticamente todas as reações do processo a partir de 1.000°C sendo que o gás o material sólido atuam como fornecedor e receptor de calor. Acima da zona de combustão, o ar retira calor do bolo de sinter já formado e abaixo da zona os gases superaquecidos passam a fornecer calor à mistura.

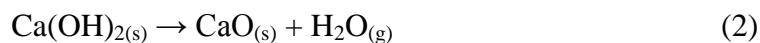
3.3 - Principais Reações do Processo

As reações de sinterização ocorrem ao longo de todo processo e divididas nas diferentes zonas citadas no item 2.1, sendo que a maioria concentrada na zona de combustão, após 1.000°C. São elas:

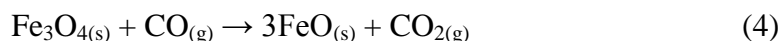
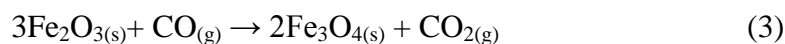
- ✓ Secagem: até 300°C. Vaporização da água livre.



- ✓ Desidratação: 400 a 500°C. Vaporização da água combinada



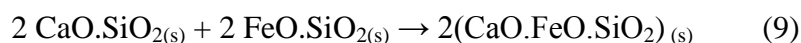
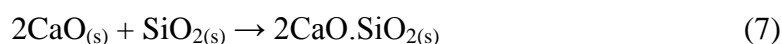
- ✓ Redução superficial do minério de ferro



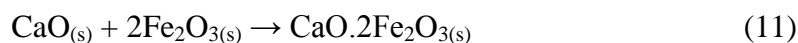
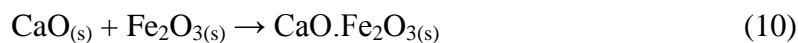
✓ Decomposição de carbonatos: 750 a 1150°C



✓ Formação de silicatos: 600 a 1300°C



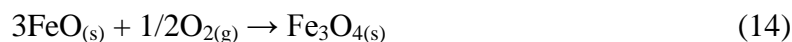
✓ Formação de Cálcio-ferritas: 600 a 1300°C



✓ Combustão do Coque: 1300°C



✓ Formação da magnetita:



A figura 3.4 ilustra bem todas as reações e suas principais funções no processo:

	ZONA ÚMIDA	ZONA DE SECAGEM	ZONA DE REAÇÃO
Temp. (°C)	100 (máximo)	100 a 500	> 500
Principais Reações:	hidratação da cal e condensação dos vapores de água $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + \text{calor}$ $\text{H}_2\text{O (g)} \rightarrow \text{H}_2\text{O (l)}$	Vaporização da umidade e desidratação dos hidróxidos de cálcio $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O} - \text{calor}$	combustão do carbono, decomposição dos carbonatos, reações na fase sólida, redução e re-oxidação dos óxidos de ferro e reações de formação da escória $\text{C(s)} + \text{O}_2 \text{(g)} \rightarrow \text{CO}_2 \text{(g)} + \text{calor}$ $\text{C(s)} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{(g)} \text{CO(g)} + \text{calor}$ $2\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}$ $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$ COMBUSTÃO DO COQUE $\text{CaCO}_3 \text{(s)} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \text{(g)}$ $\text{MgCO}_3 \text{(s)} \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2 \text{(g)}$ DECOMPOSIÇÃO DOS CARBONATOS $3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$ $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} \rightarrow 3\text{FeO} + \text{CO}_2$ $3\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2$ REDUÇÃO DA CARGA $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} \rightarrow \text{CaO.Fe}_2\text{O}_3$ $\text{CaO.Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaO.SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ $\text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ (ou FeO)} + \text{SiO}_2 \rightarrow 2\text{FeO.SiO}_2$ REAÇÕES NO ESTADO SÓLIDO

Figura 3.4 - Principais reações do processo dividido por zona.

Além das reações químicas citadas acima, durante o aquecimento da mistura ocorrem também reações na fase sólida motivadas pelo contato entre as partículas de óxido de ferro, CaO, SiO₂ e outros. São reações que ocorrem por substituição e não por combinação, que é comum quando se trata de líquido ou gás.

Como no trabalho proposto será avaliado apenas a termodinâmica, daremos ênfase apenas às equações de estado inicial e final do processo.

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.

3.4 - Matérias-primas empregadas na produção de sinter

São utilizados basicamente como matérias-primas da sinterização, a carga metálica (finos de minério de ferro – sinter feed), combustível sólido (finos de coque) e fundentes (óxidos básicos como CaO e MgO).

Todas as matérias-primas possuem qualidades controladas e conhecidas visando o atendimento das especificações tanto de processo quanto de qualidade do sínter a ser produzido.

Assim como vários outros processos, a sinterização pertence a um sistema integrado da qual a qualidade produzida por ele afetará o desempenho da etapa subsequente de forma qualitativa e também econômico. Portanto, a composição química, mineralógica, física e granulométrica da mistura de finos de minério é estabelecida de acordo com a qualidade exigida pelo processo subsequente. A produção de um sínter de baixa qualidade química e/ou física ou com um alto custo produtivo afetará diretamente os resultados técnico-econômicos do Alto-Forno.

Durante o processo de sinterização, controles específicos são fundamentados para que o produto final, o sínter, tenha a qualidade mínima desejada pelo processo seguinte, o Alto-Forno. As principais características observadas e que define a qualidade do sínter são:

- ✓ Composição química estável;
- ✓ Elevada resistência mecânica;
- ✓ Alta redutibilidade;
- ✓ Granulometria estável;
- ✓ Alto teor de ferro;
- ✓ Baixo volume de escória;
- ✓ Custo reduzido de produção;

3.4.1 – Fundentes

A função básica dos fundentes é ajudar na escorificação das impurezas na carga, formando uma matriz de escória que auxiliará na coesão dos grãos de minério conferindo qualidade física ao sínter produzido. Além disso, pode ser fonte de algum componente químico do qual se deseja ter objetivando a melhora de alguma qualidade metalúrgica.

São classificados basicamente como Ácidos (portadores de SiO_2 e/ou Al_2O_3) e Básicos (portadores de MgO e/ou CaO).

A utilização dos fundentes dependerá muito do tipo de sinter a ser produzido que, por sua vez, dependerá do regime de trabalho do Alto-Forno.

Os fundentes mais utilizados na sinterização são:

- Calcário Calcítico
- Calcário dolomítico;
- Serpentinó;
- Quartzo;
- Dunito;
- Cal;

3.4.2 – Combustível

Nas plantas de sinterização tradicionais, o coque breeze, ou finos de coque, é utilizado como combustível. Há também a utilização de finos de carvão vegetal (granulometria abaixo de 9mm) que podem ser utilizados como combustível. No entanto, há diferença entre a reatividade do carvão vegetal e do coque, o que pode levar a uma diferença na qualidade e na produtividade do sinter⁽⁷⁾. A qualidade química também difere entre os dois. O carvão vegetal possui altos teores de cinzas enquanto o coque possui altos teores de enxofre.

A reatividade do combustível interfere diretamente na velocidade das frentes de chama. Quanto maior a reatividade, maior a velocidade e, conseqüentemente, maior a produtividade na sinterização.

Com relação à qualidade do sinter, a resistência a frio também é afetada pela reatividade do combustível. A resistência diminui com o aumento da reatividade do combustível⁽⁷⁾.

3.4.3 - Minério de ferro

Visto a grande dificuldade de obtenção de uma única fonte metálica que atenda bem todas as características de qualidade exigidas, o processo de sinterização vê-se obrigado a utilizar várias fontes formando o chamado “blend” de minério. Tem-se pelo menos dois minérios como base e outros como correção. Mesma analogia para a utilização dos fundentes.

Os fatores mais importantes para classificação e utilização do minério de ferro como fonte metálica na sinterização são: qualidade química, física, granulométrica e metalúrgica.

3.4.3.1 - Qualidade Química

A análise da qualidade química a ser alimentada no processo deverá ser feita de forma sistêmica tendo a qualidade do gusa como meta final. Não há como definir a qualidade de entrada da sinterização sem analisar a qualidade do gusa a ser produzido e a participação do sinter na carga metálica. Tal característica faz com que a variação entre usuários/usinas seja bastante ampla. Sendo definida a composição química, a manutenção da baixa variabilidade é de extrema importância para a qualidade final do sinter.

Normalmente, a qualidade química está atrelado aos controles dos teores de Fe, Al_2O_3 , SiO_2 , MgO, P, PPC e alguns álcalis como K_2O e Na_2O . Além disso, o teor de FeO produzido também é de extrema importância na sinterização. Cada um dos elementos citados possui um papel particular na qualidade química e física do sinter e, devido a essas limitações, controle mais aprimorado na escolha dos minérios são exigidos.

Os limites de controle para a sílica, por exemplo, estão diretamente atrelados ao controle do nível de escória previsto e a basicidade binária ($\%CaO / \%SiO_2$) desejada no produto. No caso da alumina, além da influência no nível de escória há a influência

direta no índice de degradação sob redução (RDI) sendo, nesse caso, fundamental a granulometria final da qual a alumina estará presente, impacto esse que ainda é motivo de muita discussão no meio. Para alguns autores, em granulometrias mais finas, as partículas de Al_2O_3 participarão mais efetivamente das reações de sinterização o que poderá provocar um tensionamento na rede cristalina da hematita, gerando trincas e consequentemente mais finos. Nesse caso, maior RDI maior degradação do sínter.

Com relação ao MgO, sua presença traz um efeito benéfico ao RDI, pois quanto mais MgO mais magnetita será criada e como consequência menos hematita. A magnetita sofre menos redução a baixas temperaturas e, portanto, menor será o RDI ⁽¹⁸⁾. Em contrapartida, o nível de MgO não pode ser muito elevado pois devido ao seu alto ponto de fusão, o impacto na qualidade física do sínter é direto (Figura 3.5).

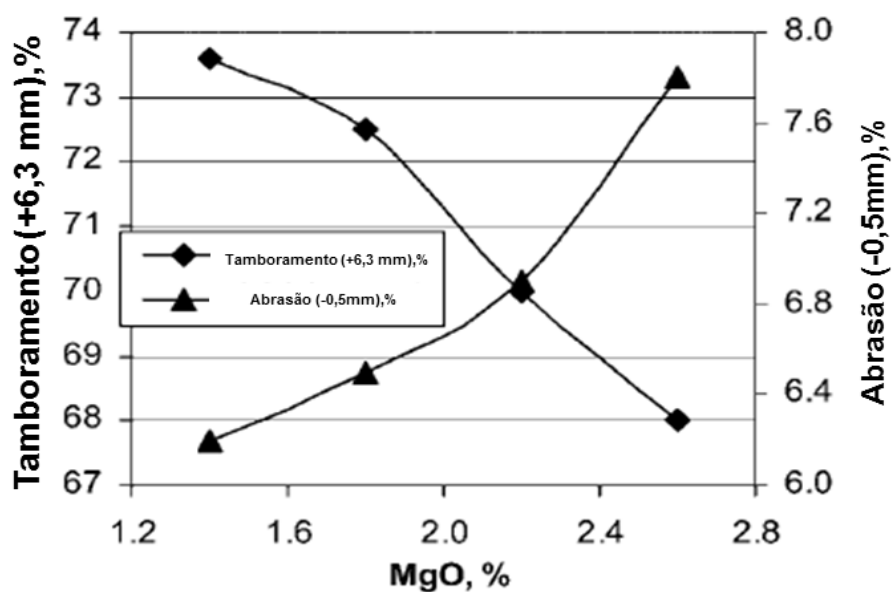


Figura. 3.5 – Influência do MgO na qualidade física do sínter ⁽¹⁸⁾.

O tamboramento e a abrasão são os índices para representação da desintegração do sínter durante o manuseio e são bastante influenciados pela presença do MgO. O tamboramento diminui e a abrasão aumenta com o aumento do MgO que diminui a presença da fase mineral cálcio ferrita e aumenta a formação de magnetita e fases silicatadas (vítreas).

A qualidade física do sinter é fundamental para boa performance do Alto-Forno porque ela esta diretamente relacionada com a permeabilidade do forno. Boa permeabilidade significa boa produtividade do reator. Além disso, a geração de finos impacta o desempenho produtivo na sinterização aumentando, ou não, a carga circulante. Apesar da importância de tais propriedades, no trabalho em questão iremos tratar apenas dos impactos do MgO na formação química do produto.

Aos elementos de menor proporção, dá-se grande atenção ao fósforo. Sua influência não é exatamente no processo de sinterização, mas sim no alto-forno. Sua eliminação no alto-forno é praticamente zero, devido às condições mínimas necessárias para sua retirada, e sua presença limita bastante a produção de aços considerados nobres.

3.4.3.2 – Qualidade Granulométrica

De forma bem direta, a granulometria das matérias primas alimentadas no processo impacta, principalmente, o desempenho da máquina de sinterização e o poder de aglomeração a frio das partículas.

A utilização da curva de Astier (figura 3.6) que estabelece que a granulometria deve ser limitada pelas malhas de 6,35mm e 150 mesh (0,105mm) com aproximadamente 50% acima de 1mm foi, por muito tempo, um parâmetro importante para definição do tamanho ideal a ser alimentada.

A necessidade de se trabalhar com um número maior de minérios na mistura e evoluções técnicas na área de preparação de misturas para sinterização, conduziu à obtenção de uma faixa granulométrica tecnicamente aceitável para a mistura de minérios a sinterizar, mais compatível com a realizada da mineração ⁽⁸⁾. Devido a isso, a distribuição granulométrica sugerida por Astier evoluiu para o conceito de distribuição granulométrica da mistura de minérios, identificado na figura 3.6 pela porção hachurada.

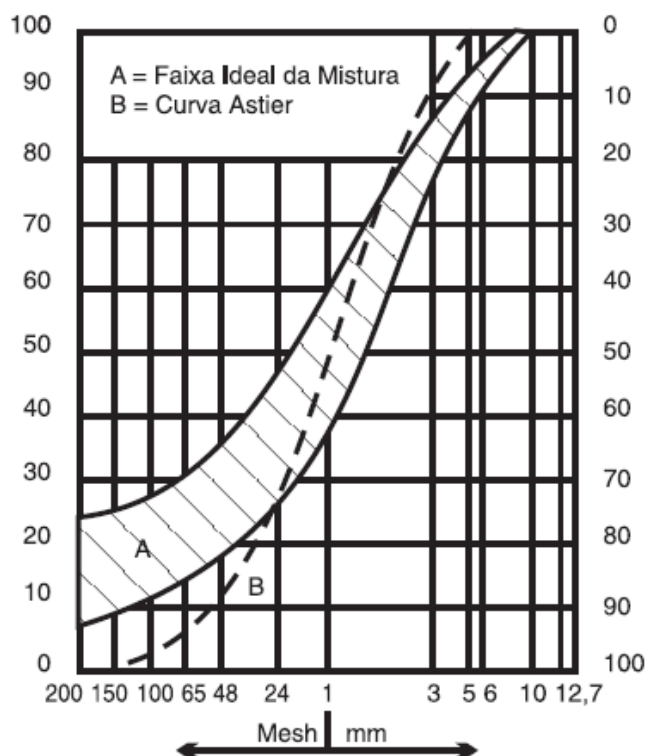


Figura 3.6 – Distribuição granulométrica ideal para mistura de minérios ⁽⁸⁾.

A distribuição granulométrica no processo de sinterização atua diretamente no desempenho do forno. Materiais muito finos irão reduzir os espaços vazios no leito de minério impactando diretamente o fluxo gasoso alterando a produtividade do equipamento. Materiais mais grossos irão impactar o tempo de reação do gás com a partícula por se tratar de uma reação topoquímica, afetando também a produtividade do forno.

3.4.3.3 – Qualidade Física

Pode-se dizer que a qualidade física esta relacionada basicamente com a qualidade granulométrica. Outros parâmetros como resistência, porosidade, densidade, etc., não são de importância considerável até o momento. No caso do produto final (sinter) ai sim a qualidade física terá papel decisivo para o processo seguinte.

3.4.3.4 – Qualidade Metalúrgica

As propriedades metalúrgicas do sinter estão atreladas a fatores mineralógicos dos minérios alimentados. Dentre várias propriedades, podemos citar a redutibilidade como a principal que, de forma direta, afetará a produtividade e desempenho do Alto-Forno. Devido à alta representatividade média do sinter nos altos-fornos do mundo, o impacto das propriedades a quente do sinter impactará a zona de amolecimento e fusão do alto-forno.

Outro fator impactante nas propriedades metalúrgicas do sinter é o teor de FeO. A formação da escória fundida é que tem maior efeito sobre a propriedade de amolecimento e fusão. A presença de FeO contribui para a formação de escória e, quanto menor o teor de FeO maior será a redutibilidade e melhor as propriedades de amolecimento e fusão. A presença do FeO é controlada tanto pela qualidade da queima ou com a presença de MgO, que impacta diretamente no ponto de fusão da escória com alto teor de FeO ⁽⁹⁾⁽¹⁴⁾.

3.5 - Permeabilidade no leito

O processo de sinterização consiste basicamente da aglomeração de partículas finas de minério de ferro, fundentes e carvão através da sucção do ar por um leito de partículas. A medida que o ar penetra, a combustão ocorre formando a frente de combustão. Considerando que a frente se move de cima para baixo (figura 3.7) o ar frio sugado resfria a parte já sinterizada e é pré-aquecido por esta. É considerado um processo de bom rendimento térmico porque a combustão localizada provoca a fusão parcial da carga na região mais quente e o gás gerado na combustão pré-aquece a carga logo abaixo ⁽⁶⁾.

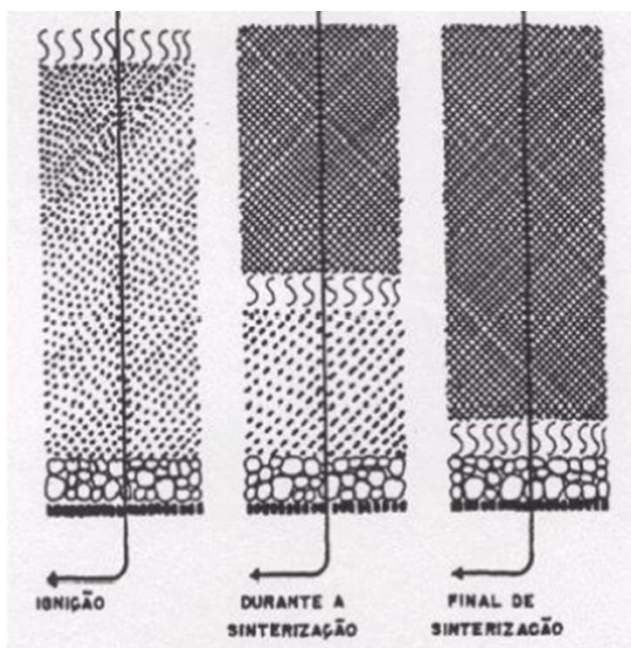


Figura 3.7 – Ignição e movimentação da frente de combustão durante a sinterização ⁽⁶⁾.

Para obtenção e manutenção do bom rendimento térmico, o controle de permeabilidade do leito se torna fundamental. Para isso, várias formas de medição da variação de pressão foram desenvolvidas e estudadas ao longo dos anos.

A equação de Ergun (1.0) descreve a variação de pressão por unidade de comprimento do leito fluidizado (leito de sinterização). É derivada de vários fatores dentre eles fricção modificado, equação de Fanning, diâmetro equivalente, Lei de Darcy, número de Reynolds da partícula além de dados experimentais.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 V_0 \cdot \mu (1-\varepsilon)^2}{\phi_s^2 \cdot D_p^2} + \frac{1,75 \cdot \rho \cdot V_0^2 \cdot (1-\varepsilon)}{\phi_s \cdot D_p \cdot \varepsilon^3} \quad (\text{eq.1})$$

Onde: ΔP = Diferencial de Pressão (Pa)

L = Altura do leito (mm)

V_0 = Velocidade superficial do gás (m/s)

μ = Viscosidade do gás (Ns/m²)

ε = fração de vazios

ρ = Densidade do gás (kg/m³)

ϕ = Esfericidade da partícula

D_p = Tamanho médio da partícula (mm)

A equação pode ser utilizada tanto no regime laminar quanto no turbulento. As propriedades granulométricas da carga e do leito são representadas pelos índices d_p (diâmetro médio da carga), ε (fração de vazios) e L (altura do leito). As propriedades dos gases são representadas pelos índices μ (viscosidade do gás), ρ (densidade do gás) e V_o (velocidade superficial do gás). O diferencial de pressão é representado por ΔP .

Para o minério de ferro, estudos com vários dados experimentais foram realizados para ajustar a equação de Ergun para esse caso específico ⁽¹⁰⁾. Porém, houve muitas dúvidas sobre a técnica utilizada para medição dos espaços vazios. Estudos utilizaram a equação de Ergun para descrever o comportamento do sinter feed na baixa e na alta temperatura e, assim como alguns estudiosos, obtiveram dúvidas sobre as técnicas para medição dos espaços vazios ⁽¹¹⁾⁽¹²⁾.

Em 1994, foi desenvolvido um método para medição dos espaços vazios do leito de partículas deformadas ⁽¹¹⁾⁽¹³⁾. Os vazios foram calculados a partir de medições feitas no local, ou seja, no leito (bulk density) e nas partículas fora do leito (densidade aparente). Foi um desenvolvimento significativo porque a equação de Ergun é muito sensível aos valores dos espaços vazios. No seu estudo, foram utilizados vários tipos diferentes de minérios com análise granulométrica medida e conhecida. Cada um gerou um “bolo” específico do qual foram alimentados em um aparato para medição da permeabilidade. Após submeter a amostra (bolo) a condições específicas para medição da permeabilidade e, conseqüentemente, queda de pressão, a amostra foi retirada para

medição do bulk density e da densidade aparente para, então, calcular os espaços vazios do leito:

$$\varepsilon = 1 - (\rho_b - \rho_a) \quad (\text{eq.2})$$

No total, foram 115 amostras submetidas ao teste de permeabilidade com densidade aparente e o bulk density calculado e medido em todos, além da velocidade superficial do gás em cada leito (Figura 3.8).

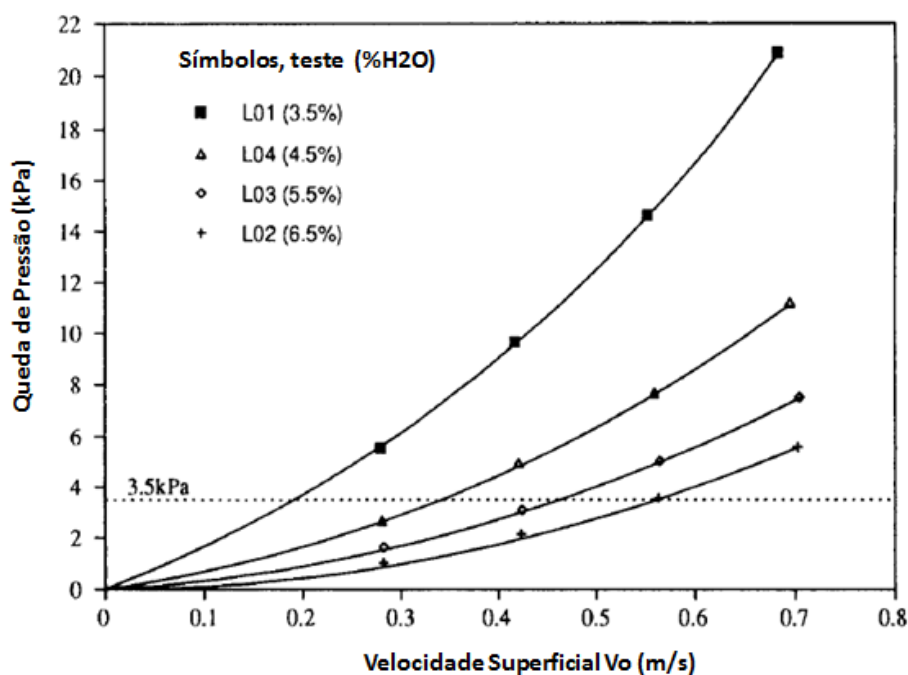


Figura 3.8 – Resultados da queda de pressão x velocidade superficial do gás para cada amostra estudada ⁽¹³⁾.

A equação de Ergun foi, então, ajustada com base nos resultados das amostras sendo os valores 150 e 1,75 revisados para 323 e 3,78, respectivamente, conforme equação 3.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{323 V_0 \cdot \mu (1-\varepsilon)^2}{\phi_s^2 \cdot D_p^2} + \frac{3,78 \cdot \rho \cdot V_0^2 \cdot (1-\varepsilon)}{\phi_s \cdot D_p \cdot \varepsilon^3} \quad (\text{eq. 3})$$

No processo de sinterização, o valor do ΔP é normalmente um dado conhecido. Portanto, no modelo proposto decidimos deixá-lo como dado de entrada.

Modelos matemáticos foram desenvolvidos para melhor distribuição de tamanhos em um leito de sinterização. Além disso, o cálculo da permeabilidade consiste da mesma equação, porém, estimando a velocidade do gás e não o ΔP , conforme equação 4 (13)(14)(15).

$$V_0 = \frac{-323.\mu.L.(1-\varepsilon)^2 + \sqrt{4.3.78.L.\rho.D_p^3.\Delta P.(1-\varepsilon).\varepsilon^3 + 323^2.L^2.\mu^2.(1-\varepsilon)^4}}{2.3.78.L.\rho.D_p(1-\varepsilon)} \quad (\text{eq. 4})$$

3.5.1 – Cálculo dos espaços vazios

Com base na equação de Ergun e suas alterações para ajuste em leito de minério de ferro, dentre vários fatores que impactam na permeabilidade a granulometria e consequentemente os espaços vazios mudam significativamente com a umidade e composição do blend ⁽¹³⁾. Essa variação é representada pela figura 3.9.

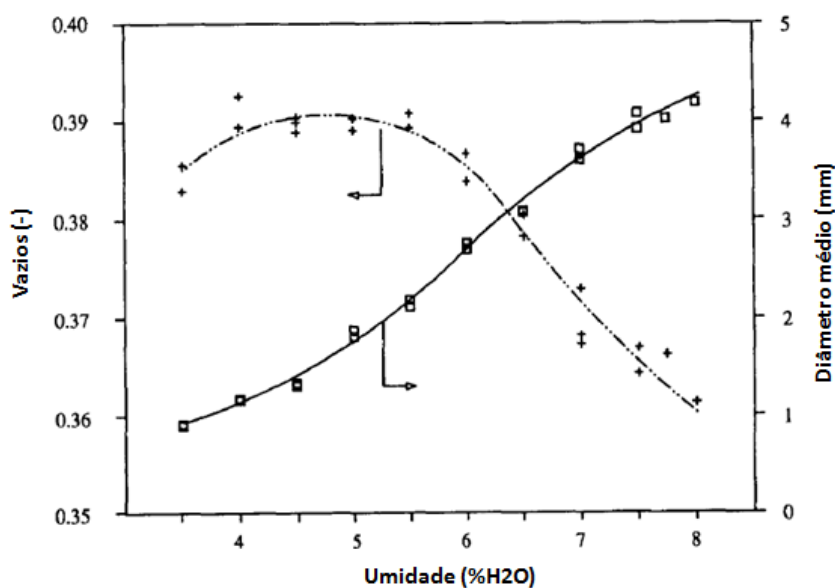


Figura 3.9 - Efeito da umidade na quantidade de vazios e no diâmetro médio ⁽¹³⁾.

3.5.2 – Consumo Energético

A matriz energética do processo de sinterização compreende gás de alto-forno, gás de coqueria, gás natural e energia elétrica. Este último responsável principalmente para

gerar fluxo de ar necessário para queima do carbono no processo, ou seja, força motriz dos ventiladores de processo.

Há vários fatores que interferem no consumo de energia elétrica, porém, a ideia principal proposta é analisar o impacto da granulometria das matérias-primas alimentadas no consumo energético do processo, convertendo em custo energético.

Para análise do efeito da granulometria dos minérios, o principal parâmetro a ser mensurado, e que é controlado no processo, é a permeabilidade do leito. Alta permeabilidade resulta em alta vazão de ar e, contrariamente, baixa permeabilidade significa baixo volume de ar e conseqüentemente maior esforço dos ventiladores para sucção de ar do ambiente externo.

Estudos com vários experimentos correlacionando a vazão de ar necessário com a velocidade da máquina foram realizados ⁽¹⁶⁾. Através dos resultados e da equação 5, o volume de ar por unidade material seco diminui com a diminuição da taxa do fluxo de ar. Conseqüentemente, o consumo energético diminui com um menor fluxo de ar induzido.

$$Q = \frac{V_o}{\rho (1,05 \cdot V_o + 0,6)} \quad (\text{eq. 5})$$

Onde: Q = Vazão de ar (Nm³/min)

V_o = Velocidade superficial do gás (m/s)

ρ = Densidade do gás (kg/m³)

A potência necessária para a vazão de ar calculada será dada pela equação 6.

$$P = \frac{Q_{ar} \cdot \Delta P}{(1000 \cdot \eta)} \quad (\text{eq. 6})$$

Onde: Q = Vazão de ar (Nm³/min)

P = Potência necessária para a vazão determinada (kW)

n = eficiência da instalação

3.6 – Formação do FeO

Diferentemente dos outros parâmetros químicos, o %FeO possui uma participação diferente no sistema pois é ele quem dita a qualidade tanto de queima quanto do produto final. Muito FeO pode causar perdas de propriedades metalúrgicas como a redutibilidade, por exemplo. Com o objetivo de melhor controle de processo, vários estudos sobre a influência na formação do FeO já foram realizados para melhor entender e prever a formação desse elemento.

Análises da influência da formação do FeO durante a sinterização principalmente em termos da composição química alimentada e das condições de queima do minério mostram como a quantidade de perda por calcinação (PPC), os teores de sílica, a quantidade de carbono e a temperatura final do processo impactam na formação final de FeO ⁽¹⁷⁾.

Através de regressões lineares, a relação entre a composição química básica dos minérios, a temperatura final de processo e a formação de FeO equações foram propostas:

$$- \%FeO_{(1.200^{\circ}C)} = 0,033 \%SiO_2 + 0,427 \%PPC + 1,534 \quad (\text{eq.7})$$

$$- \%FeO_{(1.250^{\circ}C)} = - 0,031 \%SiO_2 + 0,554 \%PPC + 2,745 \quad (\text{eq. 8})$$

$$- \%FeO_{(1.300^{\circ}C)} = 0,015 \%SiO_2 + 0,298 \%PPC + 6,650 \quad (\text{eq. 9})$$

$$- \%FeO_{(1.350^{\circ}C)} = - 0,708\%SiO_2 + 0,931 \%PPC + 10,057 \quad (\text{eq. 10})$$

As equações acima mostram que o impacto da sílica acontece em menores proporções do que o PPC.

Paralelamente, regressões lineares foram propostas para definição da relação entre a composição química básica dos minérios e a quantidade de carbono na formação de FeO, conforme equações abaixo:

$$- \% \text{FeO}_{(\% \text{C} = 3,0)} = 0,268 \% \text{SiO}_2 + 0,303 \% \text{PPC} - 0,134 \quad (\text{eq. 11})$$

$$- \% \text{FeO}_{(\% \text{C} = 4,0)} = 1,315 \% \text{SiO}_2 + 0,209 \% \text{PPC} - 1,577 \quad (\text{eq. 10})$$

$$- \% \text{FeO}_{(\% \text{C} = 5,0)} = 1,498 \% \text{SiO}_2 + 0,692 \% \text{PPC} - 1,463 \quad (\text{eq. 12})$$

$$- \% \text{FeO}_{(\% \text{C} = 6,0)} = 3,031 \% \text{SiO}_2 + 0,652 \% \text{PPC} - 2,960 \quad (\text{eq. 13})$$

Neste caso, os coeficientes da sílica e do PPC são positivos, o que significa impacto direto dos dois elementos na formação do FeO porém, a sílica contribuindo de forma mais intensa.

Outra influência na formação do FeO considerada é a quantidade de MgO alimentada no forno e seu impacto nas propriedades do sinter, dentre elas a formação de FeO ⁽¹⁸⁾. Análises realizadas com diferentes teores de MgO alimentados no forno mostraram formações de FeO em níveis diferentes, conforme figura 3.10.

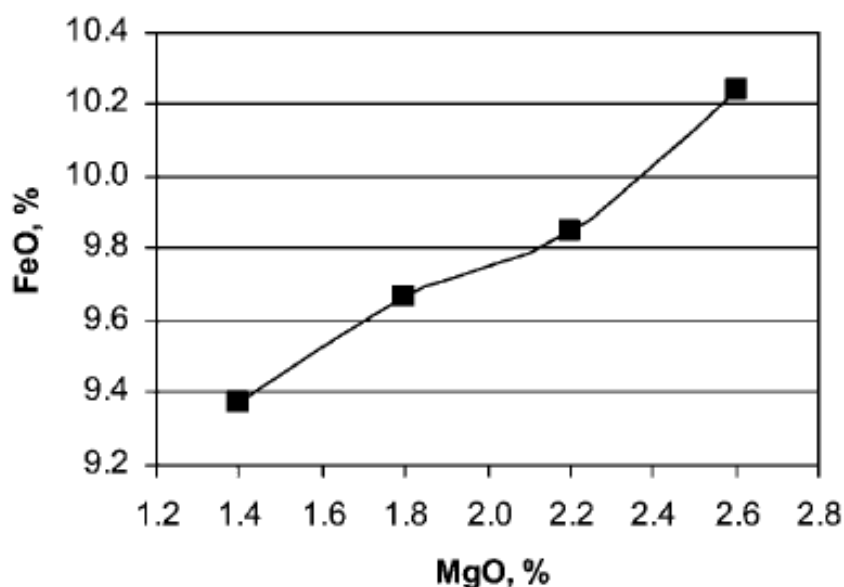


Figura 3.10 – Influência do MgO na formação de FeO no sinter ⁽¹⁸⁾.

3.7 – Mecanismos atuais para precificação do minério de ferro

Até meados de 2010, grande parte do minério de ferro comercializado no mundo tinha o preço baseado no sistema de preço referência que, após ser concluída uma negociação entre um comprador e um fornecedor, todo o mercado seguia o reajuste aplicado ⁽¹⁹⁾.

O sistema de preço referência entre as mineradoras e siderúrgicas vigorou como convenção de determinação do preço por mais de 40 anos. No entanto, após a quebra dos contratos pela siderurgia chinesa durante o ano de 2009 e, sobretudo, a partir do segundo trimestre de 2010, a dinâmica do estabelecimento de preços na indústria transoceânica do ferro foi alterada, tendo as mineradoras, notadamente a Vale e a BHP Billiton, sido agentes dessa mudança, induzido o sistema de precificação trimestral ⁽²⁰⁾.

A precificação trimestral implica no reajuste dos níveis de preços do minério a cada 3 meses. Esse tem como base a média dos preços do minério de ferro praticados no mercado à vista, sem frete e entregue na China com 62% de ferro, com defasagem de um mês. Soma-se o valor em uso referência para cada ponto percentual de ferro além dos 62%. Depois, acrescenta-se o frete e o bunker atrelado ao caminho (figura 3.11).

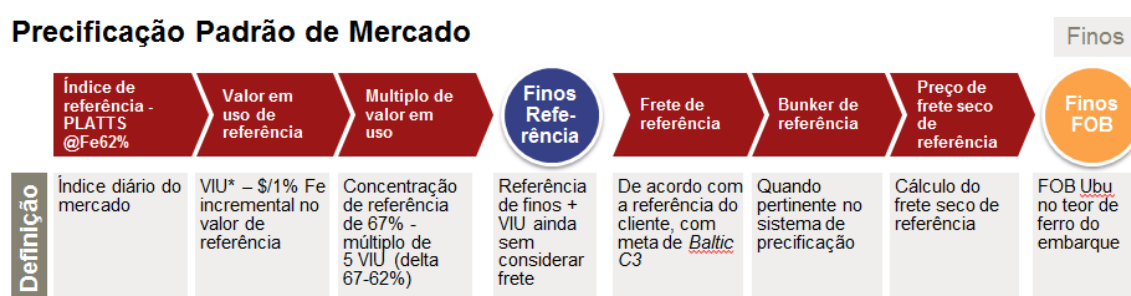


Figura 3.11 - Cálculo para precificação de finos de minério de ferro no modelo trimestral.

Concretamente, o sistema de precificação trimestral foi uma solução encontrada pelas mineradoras diante da redução de receitas durante a crise econômica mundial de 2009, quando a queda na demanda por aço levou as siderúrgicas a romperem os contratos de longo prazo, suprindo os seus altos-fornos com minério de ferro comprado no mercado spot (aquele no qual a entrega de mercadoria é imediata e o pagamento é feito à vista),

cujos preços eram inferiores aos acordados nos contratos anuais no período pré-crise. De um modo geral, o estabelecimento de preços trimestrais reúne algumas características do sistema de definição de referência, como certa estabilidade dos preços, e outras características do mercado à vista, com a maior flutuação que, num contexto de excesso de demanda, favorece a flexibilidade dos preços à alta em intervalos bem mais curtos. Vale notar, é bastante útil para os produtores que dependem do frete Brasil-Ásia, pois caso a duração das operações logísticas e de produção (extração, beneficiamento, frete terrestre e viagens marítimas que duram cerca de seis semanas) e o período de vigência dos preços (doze semanas). No caso dos produtores australianos, a duração das operações de produção (minério nem sempre beneficiado) e do frete marítimo é menor, o que reduz a interferência das flutuações de preço no mercado à vista sobre a gestão das operações ⁽³⁴⁾.

Como referencia, na figura 3.12 temos o histórico de preços de minério de ferro entre 2009 e 2016:



Figura 3.12 - Histórico de preços de minério de ferro ⁽³⁶⁾.

3.8 – Conceito de Valor em Uso

Ser competitivo é, atualmente, condição mandatória para sobrevivência no mercado. Estratégias de redução de custos são sempre encaradas como mandatória e, quando for uma questão de sobrevivência, normalmente intensificam-se os esforços dos clientes para aquisição e uso de matérias-primas mais baratas. Normalmente, quando não há a necessidade de maximização da produtividade, em casos de restrições de mercado, por exemplo, é comumente viável o emprego de matérias-primas menos nobres.

Como forma de avaliar as diferenças existentes entre dois produtos com foco no resultado oferecido em termos de “ganho” no processo, torna a diferenciação algo extremamente importante no mundo dos negócios e ocorre inevitavelmente e intencionalmente a todo o instante, até mesmo para aqueles produtos e serviços com menor grau de diferenciação. A importância de diferenciá-los está ancorada na necessidade destes de terem que fazer a diferença em conseguir novos clientes ao serem ofertados e uma vez entregues terem a capacidade de mantê-los ⁽²⁰⁾.

Várias são as aplicações existentes no mercado para análise de diferenciação de produtos, preços, mercado, etc., porém, a aplicação de tais metodologias busca, de forma geral, interpretar com eficácia a percepção de um dado cliente ou de um conjunto de clientes para uma determinada matéria-prima fornecida, consolidar, com o maior grau de precisão possível, a visão sobre as tendências de mercado e tecnológicas além de direcionar esforços e priorizar ações voltadas para a reformulação dos produtos existentes.

Com o mercado cada vez mais competitivo, torna-se necessário e evidente o foco maior no core business da empresa o que significa desenvolvimento de esforços relacionados não só no processo interno de fabricação, mas na aplicabilidade do seu produto no processo do cliente. A aproximação com o cliente é de fundamental importância nesse contexto.

A relação entre o valor percebido e a qualidade percebida ainda significa a mesma coisa em muitas empresas. Assume-se que se a qualidade do produto melhora, o valor entregue ao cliente automaticamente aumenta, pressuposto incorreto e incompleto. A qualidade percebida pode ser entendida como o julgamento do consumidor sobre a excelência de um produto. Diferentemente do conceito de valor percebido, não envolve uma troca entre os elementos dados (custos) e recebidos (benefícios)⁽²²⁾.

Dentro desse contexto, os clientes enxergam o produto como um conjunto de atributos e desempenhos desses atributos; quando compram e usam o produto, desenvolvem preferências e desejos por certos atributos que lhes proporcionam as conseqüências desejadas nas situações de uso, atendendo seus objetivos e gerando satisfação com o valor recebido⁽²²⁾. Conceito básico de valor em uso.

Portanto, o valor em uso de um determinado produto faz parte dos aspectos relevantes do valor percebido pelo cliente, ou seja, um mesmo produto ou serviço pode ter diferentes significados ou valores para o consumidor, segundo o tipo de uso a que se destina. A figura 3.13, ilustra de forma simplificada a utilização do conceito de valor em uso proposto no trabalho. Tem-se um cenário A (cenário base), onde há um conjunto de fatores sendo processados (matéria-prima, insumo, equipe, tecnologia, etc) gerando um produto final com um determinado custo e margem. No cenário B, alterou-se uma parte do conjunto de fatores, substituindo a matéria-prima, com qualidade inferior ou superior. O custo final e margem final sofrerão um impacto, positivo ou negativo. A diferença desse impacto comparado ao cenário base é o que chamamos de Valor em Uso atrelado à qualidade da matéria-prima substituída.



Figura 3.13 – Conceito de valor em uso.

Com base nos comentários anteriores, assumiremos nesse trabalho um conceito de diferenciação com viés econômico, cujo valor de um material é o máximo que se pode pagar por um substituto, sem que isto piore o resultado econômico⁽²²⁾. Além disso, adotaremos o valor em uso de um produto também como sendo o prêmio ou desconto, que o mesmo poderia oferecer, comparativamente a um preço referência de um material, predominantemente assumido como referência⁽²¹⁾.

3.8.1 - Valor em Uso aplicado ao desenvolvimento de produtos

O cenário atual da siderurgia mundial está “forçando” cada vez mais a maximização do uso de matérias primas. Portanto, para melhor eficiência em termos de rendimento financeiro é razoável e oportuno se pensar e se discutir algum tipo de reconhecimento, prêmio ou diferenciação de preço, durante a rodada de negociações, para um maior estímulo ao fornecimento de determinadas especificações de sinter, que, por ventura, possam resultar em um superior desempenho no cliente, com ganhos reais, em termos de produtividade e/ou de redução de custo. O que se observa em várias situações é que seria, justamente através desta diferenciação, que se viabilizaria o desenvolvimento de novas especificações e, até mesmo, de novos produtos com importantes ganhos, tanto para os usuários quanto para os produtores⁽²⁰⁾.

No modelo atual de precificação de minério, a diferenciação de preço é aplicada com foco no %Fe presente. Teores mais altos, mais caro o produto. Podemos dizer que a classificação de “commodity” já não se aplica em 100% na sua essência no mercado de minério de ferro. Visto isso, o grau de amadurecimento das relações comerciais entre cliente e fornecedor vem aumentando a cada dia com cooperação técnica no entendimento dos processos existentes e das suas respectivas limitações à qualidade das matérias primas. Esse novo viés, vem possibilitando fornecedores e usuários a estarem mais atentos às oportunidades de integração mais eficaz da cadeia de valor.

Dentro do conceito generalista de “commodity”, a diferenciação dos produtos seja pela qualidade oferecida seja pela performance gerada, torna-se necessário análises mais criteriosas do que realmente um determinado produto possa trazer de ganhos financeiros a um processo. A vantagem competitiva deve agregar mais valor para o cliente, exemplo, preço menor, melhor qualidade, melhor atendimento e ainda buscar estratégias que possam impedir que a concorrência copie ⁽³⁵⁾. Adicionalmente, a diferenciação é algo extremamente importante no mundo dos negócios e ocorre inevitavelmente e intencionalmente a todo o instante, até mesmo para aqueles produtos e serviços com menor grau de diferenciação. A importância de diferenciá-los está ancorada na necessidade destes de terem que fazer a diferença em conseguir novos clientes ao serem ofertados e uma vez entregues terem a capacidade de mantê-los ⁽²⁰⁾.

3.9 - Modelagem computacional no processo de sinterização

Vários parâmetros e/ou definições são necessários para criação de um modelo de sinterização de minério de ferro. Além da clara definição do objetivo, o entendimento do processo na sua essência (termodinâmico, cinético, fenômenos de transporte de massa e de energia envolvidos) se torna fator essencial para o atingimento do melhor resultado.

Basicamente, os modelos já criados podem ser divididos nos grupos abaixo:

- Modelos de balanço de massa - baseiam-se no princípio de conservação de massa e são usados para fundamentar quantitativamente, eficiências, rendimentos, dimensionamento de instalações e de equipamentos, etc.
- Modelos de balanço térmico – tem como objetivo fazer um balanço de entradas e saídas de calor de determinado sistema durante um dado período de tempo.
- Modelos termoquímicos – podem ser globais e/ou estagiado (discreto ou diferencial). No balanço global, a sinterização é considerada como um todo, não importando o que ocorre nas diferentes regiões do processo. Já no balanço estagiado é feita uma análise de todas as etapas que ocorrem em cada região do processo, separadamente.
- Modelos cinéticos – A concepção destes modelos necessita do desenvolvimento do método matemático para a determinação da taxa de redução para cada uma das constantes cinéticas dos óxidos de ferro e componentes da carga com auxílio de curvas definidas experimentalmente, em tempo real. Os modelos cinéticos são um avanço dos modelos termodinâmicos, pois além dos balanços de massa e térmico, introduzem as velocidades das reações com o objetivo de determinar a extensão delas ao longo da sinterização.
- Modelos empíricos – São modelos obtidos através de experimentos ou através da observação da operação realizada.
- Modelos híbridos – são modelos que incorporam informações práticas, combinação entre o modelo termoquímico e inclui dados empírico-práticos de valor comprovados.

Atualmente, modelos cinéticos e tridimensionais para simulação de perfis de temperatura, perfil dos gases nas zonas de queima, qualidade física final produzida, emissão de particulados, são os mais encontrados na literatura.

4. – Metodologia

A metodologia para desenvolvimento do trabalho tem como base a criação de um modelo de característica híbrida, ou seja, compreenderá um balanço de massa acoplado a um balanço térmico.

No balanço de massa, a qualidade alimentada na grelha será um dado de entrada e o produto final será calculado. Algumas características obedecerão “políticas” ou regras restritas de trabalho que ditarão o comportamento de determinadas funções.

A qualidade química e o custo final de produção do sínter são baseados no balanço de massa e térmico. Outras características das matérias-primas foram inseridas de forma empírica objetivando sempre avaliar o impacto no custo final de produção.

Avaliou-se também, o impacto da qualidade granulométrica das matérias-primas no custo final com base no consumo energético dos ventiladores de processo. A equação de Ergun ajustada para leitos de minério de ferro foi utilizada como política para cálculo da velocidade superficial dos gases.

Para viabilizar a integração entre os balanços, empregou-se o código “Visual Basic for Applications” (VBA) como uma linguagem de programação única, que por sua vez é constante na plataforma Excel do ambiente Windows. Principalmente nas áreas de interface com o usuário, optou-se em cada modelo pelo emprego da língua inglesa, naturalmente levando-se em consideração o potencial público-alvo para utilização desta ferramenta.

Foi preservada a característica de fácil transportabilidade deste programa de computador, tendo em vista que o mesmo pode ser instalado e operado, normalmente, em computadores portáteis comuns ou mesmo em “desktops” pelos usuários.

A figura 4.0, mostra a estrutura básica do modelo.

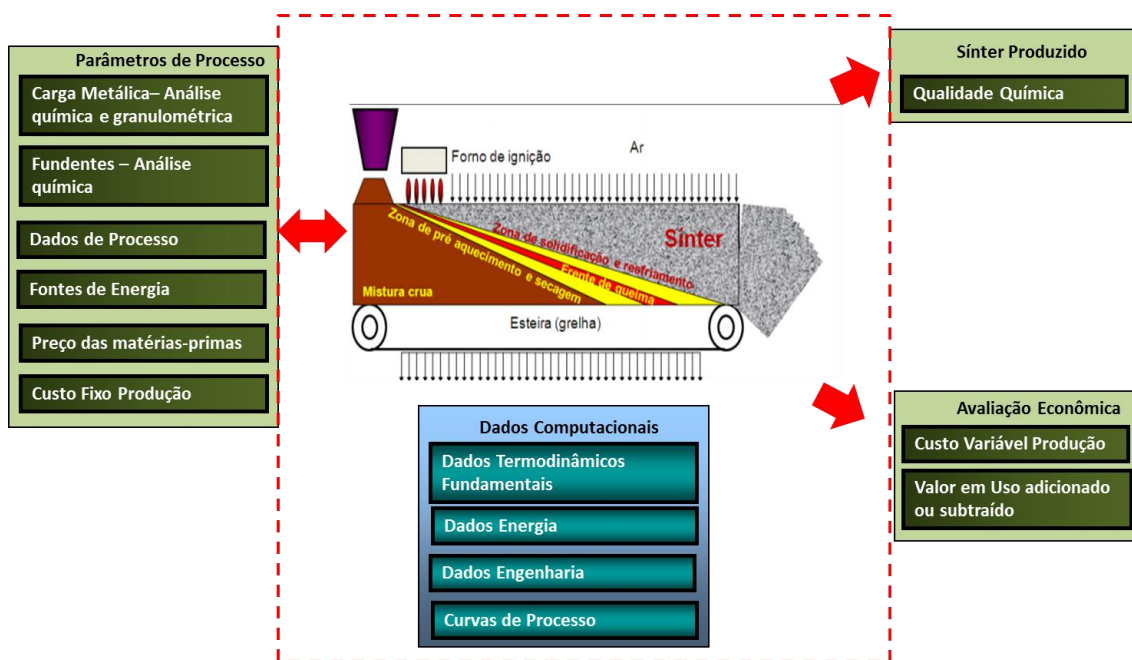


Figura 4.0 – Estrutura macro de funcionamento do modelo proposto.

4.1 - Modelagem Computacional

Um modelo computacional é a representação de um sistema físico com base em comportamentos matemáticos representativos do processo. Representa uma visão de um sistema real e complexo a partir de variáveis mais relevantes deste sistema em análise.

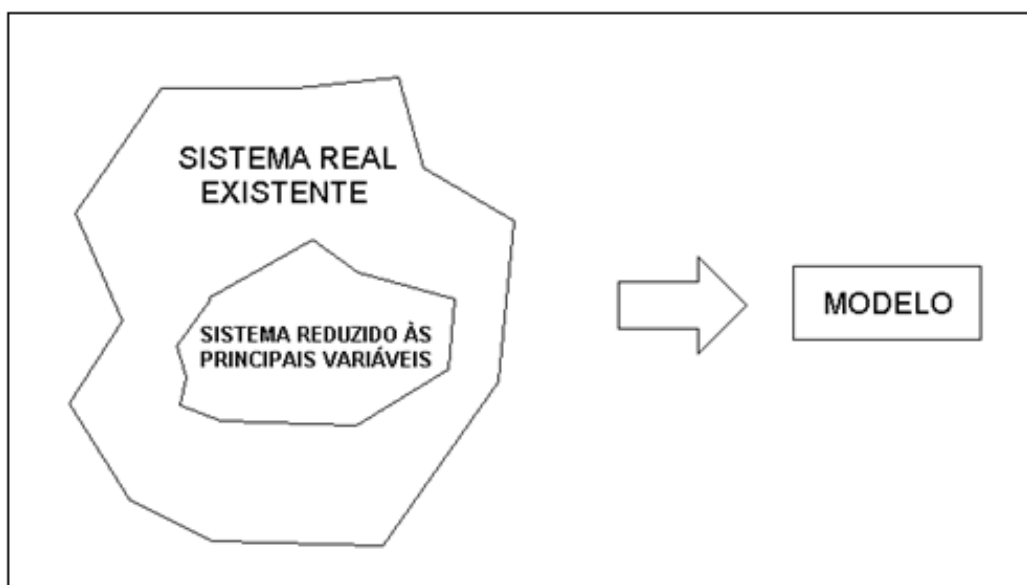


Figura 4.1 - Representação simplificada do processo de modelagem ⁽¹⁷⁾.

A classificação dos modelos varia de acordo com a complexidade, tipo e forma de processo. Basicamente são classificados como modelos conceituais, modelos simbólicos ou matemáticos e modelos heurísticos ⁽¹⁹⁾.

Os modelos matemáticos são os mais utilizados na engenharia e são subdivididos em modelos de simulação - que buscam oferecer uma representação do mundo real com o objetivo de permitir a geração e análise de alternativas, antes da implementação de qualquer uma delas cuja escolha da melhor alternativa, não é fixada na estrutura do modelo, e modelos de otimização - que são estruturados para selecionar uma única alternativa ótima segundo os critérios estabelecidos ⁽¹⁹⁾.

Devido à grande demanda por resultados rápidos e mais precisos, o crescente desenvolvimento da tecnologia dos microcomputadores atuais possibilitou o acesso à utilização de modelos matemáticos nas indústrias.

No setor siderúrgico, o modelamento matemático deixou de ser inovação ou assunto acadêmico para tornar-se uma ferramenta de altíssimo valor na checagem de comportamento de parâmetros operacionais, análise de valor de determinadas matérias primas no processo, previsão de consequências decorrentes de alterações nos parâmetros de processo, sempre com foco no desempenho técnico-econômico ⁽¹⁹⁾.

5.0 – Resultados e Discussões

5.1 – Desenvolvimento do Modelo

O motivador principal para o desenvolvimento do modelo proposto foi a possibilidade de ter uma ferramenta de fácil manuseio e interface gráfica amigável, que pudesse gerar para o usuário a possibilidade de análises técnico econômica do impacto da qualidade química e granulométrica no processo de sinterização.

Para tal, a qualidade das cargas alimentadas na esteira teriam características definidas/conhecidas e conseqüentemente sairão como produtos na forma de sinter. Determinou-se também que o balanço do FeO seguiriam políticas e equacionamentos determinados. Além disso, o impacto do diâmetro médio no resultado final será baseado na equação de Ergun, alimentando rotinas para o cálculo de energia gasta de ventiladores de processo. Políticas, nesse caso, é a coerência de fatos operacionalmente aceitos com as previsões obtidas nos resultados modelados.

No desenvolvimento do modelo foram definidas as principais variáveis impactadas pelas alterações na qualidade das cargas metálicas, chamadas de “*outputs*” do modelo, são elas:

- ✓ Consumo total e específico de carga metálica (kg/t sinter);
- ✓ Qualidade química do sinter produzido (%);
- ✓ Consumo energético específico (kWh/t sinter);
- ✓ Consumo de carvão específico (kg/t sinter);
- ✓ Custo do sinter produzido (US\$/t sinter);

Para atingir tais resultados, dados de “*inputs*” definidos estão listados abaixo:

- ✓ Massa da carga metálica específica (kg/t sinter);
- ✓ Análise química da carga metálica (%);
- ✓ Massa dos fundentes alimentados (kg/t sinter);
- ✓ Análise química dos fundentes (%);
- ✓ Diâmetro médio específico de cada matéria-prima alimentada (mm);
- ✓ Análise química do coque alimentado (%);
- ✓ Volume (Nm³/t sinter) e PCI (kcal/m³) dos gases utilizados no processo;
- ✓ Volume (Nm³/t sinter) e PCI (kcal/m³) do carvão utilizado no processo;
- ✓ Temperatura final do processo de sinterização (°C);
- ✓ Composição química do gás de topo (%);
- ✓ Altura do leito, comprimento e largura (mm, m);
- ✓ Diferencial de pressão no leito (mmH₂O);

As perdas térmicas foram calculadas pelo balanço térmico final (Entrada – Saida).

A arquitetura do modelo utiliza como base de cálculo a produção total a ser atingida deixando flexível sua escolha. Os cálculos envolvem um extenso balanço de massa e energético do processo de sinterização de minérios de ferro e contemplam diversas flexibilidades, como a utilização de várias fontes metálicas; utilização de fluxantes para obtenção de qualidade química específica; escolha de alternativas para fontes energéticas no processo; características dimensionais do forno; propriedades físicas do gás.

É feita uma análise do custo de produção de sínter e a análise de Valor em Uso dos diversos insumos utilizados no processo é realizada, inclusive considerando fatores econômicos e de mercado como custos fixos.

5.2 - Fluxo Estrutural do Modelo

O modelo é dividido em três blocos para cálculo dos principais parâmetros a serem analisados. Todos trabalham de forma paralela e dependente uma da outra, ou seja, variáveis comuns para ambos os blocos.

A base de cálculo do modelo é suportada pela resolução de um balanço de massa e de energia baseado em um conjunto inicial de valores mássicos, termodinâmicos e temperatura final do processo.

Como estamos tratando de um modelo termodinâmico, consideramos todo o processo como uma espécie de “caixa preta” sendo relevante apenas os dados de entrada e saída, sem preocupar com as reações intermediárias que acontece efetivamente dentro do sistema.

5.2.1 - Balanço de Massa

Diferentemente de outros processos metalúrgicos, na sinterização não há separação entre dois produtos (escória e produto final) e, portanto, o balanço de massa considera necessariamente entrada igual à saída.

No balanço em questão, os principais parâmetros para o cálculo são a qualidade química e quantidade (kg/ton) da carga metálica, fundentes e carvão. Como nos minérios e fundentes há uma variedade grande de elementos químicos, foi no balanço apenas os principais com base no realizado na prática industrial. São eles: %Fe, %SiO₂, %FeO, %Al₂O₃, %CaO, %MgO, %Mn, %P, %S, %TiO₂, %H₂O e LOI (Loss of Ignition). Com base no teor de ferro e FeO, estima-se o %Fe₂O₃ presente em cada minério alimentado.

A figura 5.0 mostra a entrada de dados relativos à qualidade química dos minérios e fundentes:

		Iron Source							
		MINERIO A	MINERIO B	MINERIO C	MINERIO D	MINERIO E	MINERIO F	MINERIO G	CONCENTRADO
Chemical Analysis	%Fe ₂ O ₃	85,70	90,45	90,46	81,78	93,95	96,11	96,44	101,80
	%Fe	59,94	63,26	63,27	57,20	65,90	67,54	67,45	71,20
	%FeO					0,24	0,41		
	%SiO ₂	8,25	5,05	4,18	7,90	4,55	0,69	1,32	0,41
	%Al ₂ O ₃	2,23	1,32	1,30		0,59	0,84	0,57	0,04
	%CaO	0,15	0,14	0,13	9,00	0,02	0,02	0,02	0,02
	%MgO	0,03	0,07	0,14	1,50	0,02	0,02	0,06	0,73
	%Mn	0,370	0,070	1,090	0,320	0,180	0,260	0,900	
	%P	0,060	0,040	0,068		0,050	0,085	0,062	0,010
	%S					0,007	0,012	0,007	0,050
	%TiO ₂					0,06	0,05	0,03	
	%H ₂ O					3,00	3,00	3,00	
	%LOI	2,43	2,52	2,04	0,20	0,58	1,94	0,83	
	Diâmetro médio (mm)		0,90	1,42	1,60	3,00	1,00	1,00	1,00
Load Temperature (°C)					25				
Price (US\$/ton)		154	164	164					
Kg in Burden		720	40	59	400				
% in Burden		59,1%	3,3%	4,8%	32,8%				

	FLUXING AGENTS					COKE BREEZE		
	LIMESTONE	Dolomita	Dunito	CAL	Serpentinito	Coque Fino Sint	ANTRACITO	
%Fe	0,69		4,95	0,26	7,8			
%FeO			2,8	0,14				
%SiO ₂	3,5	1,42	38,5	0,61	38			
%Al ₂ O ₃	0,8	0,1	3,83	0,24	1,12			
%CaO	52	39,5	2,17	93	0,38			
%MgO	0,5	15	34,2	0,96	37			
%Mn	0,03	0,53	0,1	0,02		12	9	PCI
%P	0,02		0,014	0,01		3,52	1,65	Ash
%S				0,02				Volatile matter
%TiO ₂			0,074	0,017		85	85	%C
%H ₂ O								H ₂ O

Figura 5.0 – Qualidade de entrada dos minérios e fundentes.

5.2.1.1 – Política do FeO

Considerou-se no modelo proposto a formação do FeO influenciado pela temperatura, %SiO₂, %PPC, quantidade de carbono e MgO alimentada. O sistema “varre” as três condições de contorno citadas para a formação:

A) Temperatura

$$- \%FeO_{(1.200^{\circ}C)} = 0,033 \%SiO_2 + 0,427 \%PPC + 1,534 \quad (\text{eq. 14})$$

$$- \%FeO_{(1.250^{\circ}C)} = - 0,031 \%SiO_2 + 0,554 \%PPC + 2,745 \quad (\text{eq. 15})$$

$$- \%FeO_{(1.300^{\circ}C)} = 0,015 \%SiO_2 + 0,298 \%PPC + 6,650 \quad (\text{eq. 16})$$

$$- \%FeO_{(1.350^{\circ}C)} = - 0,708\%SiO_2 + 0,931 \%PPC + 10,057 \quad (\text{eq. 17})$$

B) Carbono

$$- \%FeO_{(\%C = 3,0)} = 0,268 \%SiO_2 + 0,303 \%PPC - 0,134 \quad (\text{eq. 18})$$

$$- \%FeO_{(\%C = 4,0)} = 1,315 \%SiO_2 + 0,209 \%PPC - 1,577 \quad (\text{eq. 19})$$

$$- \%FeO_{(\%C = 5,0)} = 1,498 \%SiO_2 + 0,692 \%PPC - 1,463 \quad (\text{eq. 20})$$

$$- \%FeO_{(\%C = 6,0)} = 3,031 \%SiO_2 + 0,652 \%PPC - 2,960 \quad (\text{eq. 21})$$

C) MgO

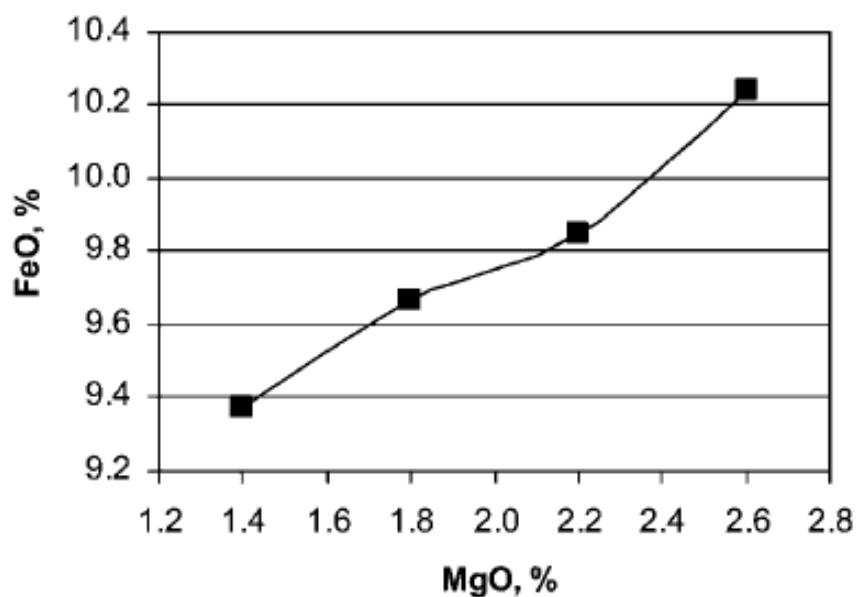


Figura 5.1 – Influência do MgO na formação de FeO no sinter ⁽¹⁸⁾.

5.2.2 Balanço de Energia

O balanço de energia tem como fundamento relações termodinâmicas utilizadas para cálculos de calores sensíveis de aquecimento entre as temperaturas de carregamento e final de processo, entalpias de reação dos processos considerados e pesos moleculares de cada substância alimentada. Todos os cálculos foram executados utilizando os dados constantes na tabela V.1, de Dados de Engenharia.

Tabela V.1 – Dados Termodinâmicos para Metalurgistas

Molecular masses (g/mol)		CP(J/kg.mol)	TABELAS COEFICIENTE DE ENTALPIAS				
				A	B	C	D
Al	26,98	24,35	MnO	11,11	0,97	0,88	-3694
Al ₂ O _{3(s)}	101,96	79,04	SiO _{2(s)}	14,40	1,02	0,00	-4696
C	12,01	8,52	Al ₂ O _{3(s)}	27,49	1,41	8,38	-11132
Ca	40,08	25,31	CaO(s)	11,67	0,54	1,56	-4051
CaCO ₃	100,09	81,88	CaCO ₃	24,68	2,62	6,20	-9760
CaO(s)	56,08	42,80	MgO(s)	10,18	0,87	1,48	-3609
CaS	72,14		MgCO ₃	18,62	6,90	4,16	-7560
Cd	112,41	20,79	C	4,03	0,57	2,04	-1936
CdO	128,41	43,43	CO	6,79	0,49	0,11	-2105
CH ₄	16,04	35,31	CO ₂	10,57	1,05	2,06	-3936
CO	28,01	29,14	H ₂	6,52	0,39	-0,12	-1938
CO ₂	44,01	37,11	Fe ₂ O _{3(s)}	31,71	0,88	0,00	-8446
Cr	51,99	23,35	Fe ₃ O _{4(s)}	48,00	0,00	0,00	-12650
Cr ₂ O ₃	151,98		FeO(s)	11,66	1,00	0,67	-3790
Fe(s)	55,85	25,10	Fe(s)	5,80	0,99	0,00	49
FeO(s)	71,84		Mn(s)	6,03	1,78	0,44	-2104
Fe ₂ O _{3(s)}	159,69	103,85	TiO ₂	17,97	0,14	4,35	-6829
Fe ₃ O _{4(s)}	231,53	143,43	O ₂	7,16	0,50	0,40	-2313
FeS	87,91	50,54	N ₂	6,83	0,45	0,12	-2117
H ₂	2,02	28,82	H ₂ O	7,30	1,23	0,00	-2286
H ₂ O	18,02	75,29					
H ₂ S	34,08	34,23	Substancia	ΔH° 298 (kcal/mol)			
K	39,09	29,58	C(s)	0,00			
K ₂ O	94,18		O ₂ (g)	0,00			
Mg	24,30	24,89	CO ₂ (g)	-94,05			
MgCO ₃	84,31	75,52	CO(g)	-26,42			
MgO(s)	40,30	37,15	CaCO ₃ (s)	-288,40			
Mn(s)	54,94		CaO(s)	-151,60			
MnO	70,94		MgCO ₃ (s)	-262,00			
MnO ₂	86,94		MgO(s)	-143,70			
N ₂	28,01	29,12	Fe ₂ O ₃ (s)	-196,30			
NO _x	46,01	29,84	Fe ₃ O ₄ (s)	-266,90			
Na	22,99	28,24	FeO(s)	-63,20			
Na ₂ O	61,98		CaO.Fe ₂ O ₃				
O ₂	32,00	29,35	CaO.SiO ₂				
P(s)	30,97	23,84	SiO ₂ (s)	-217,00			
P ₂ O ₅	141,94		FeO.SiO ₂				
Pb	207,20	26,44	H ₂ O(g)	-57,80			
PbO	223,20	45,70	H ₂ O(l)	-68,30			
S	32,06	23,00					
Si	28,09	20,00					
SiO _{2(s)}	60,08	44,43					
SO _y	64,06						
Ti	47,88						
TiC _n	68,90						

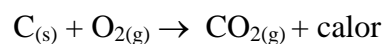
Para o cálculo do balanço térmico, definiu-se a temperatura final de processo como a temperatura de referência. O sistema considerado foi o forno de sinterização com entradas e saídas de calor definidas a seguir.

5.2.2.1 – Entradas de Calor

O modelo engloba como “entradas de calor” no sistema os seguintes itens:

- A. Calor da queima do carvão;
- B. Calor das reações exotérmicas envolvidas;
- C. Calor da reação de hidratação da cal;
- D. Calor gerado pelos gases de ignição;

A. Calor da queima do carvão



A equação acima rege a queima do carbono no sistema. Todo calor necessário é calculado a partir da massa de carvão necessária para a queima. Estudos de uma grande siderúrgica mundial realizada em várias plantas do grupo mostrou que a partir da quantidade de calor inserida no processo via gás de coqueria, gás de alto-forno ou gás natural, é possível estimar a quantidade de carbono fixo a ser consumido de acordo com a curva mostrada na figura 5.2.

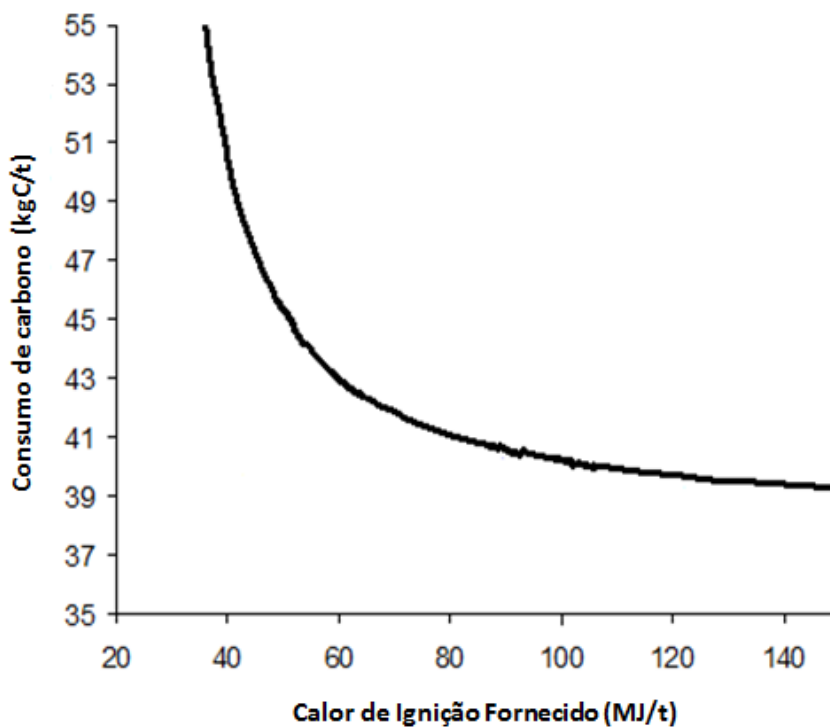


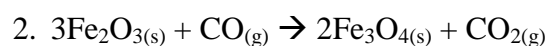
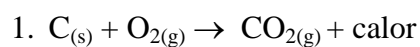
Figura 5.2 – Variação do consumo de carbono versus energia necessária para ignição ⁽³⁷⁾.

Para o cálculo citado, o modelo utiliza a equação 22, que representa a curva na figura acima.

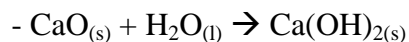
$$M_{carvao} = 118,11Q_{ignição}^{-0,232} \quad (\text{eq. 22})$$

B. Calor das reações exotérmicas envolvidas

O calor das reações exotérmicas foi estabelecido a partir do cálculo da entalpia padrão de cada reação e do número de moles presentes de cada substância. As reações exotérmicas consideradas no processo de construção do modelo foram⁽³³⁾:



C. Calor da reação de hidratação da cal



D. Calor gerado pelos gases de ignição

Os gases de ignição considerados são gás de coqueria, gás de alto-forno e gás natural sendo que esse último como opção de utilização. Todos os calores são baseados no valor de PCI e na quantidade utilizada no processo (figura 5.3).

ENERGY SOURCE	
BLAST FURNACE GAS (BFG)	
PCI (kcal/m3)	700
Volume (Nm3/ton)	2
Price (US/Nm3)	
COAL	
PCI (kcal/kg)	7200
%C fixo	89
Wet weight (kg/ton)	49,13
Price (US/ton)	238
COKE OVEN GAS (COG)	
PCI (kcal/m3)	3100
Volume (Nm3/ton)	3
Price (US/Nm3)	
NATURAL GAS	
PCI (kcal/m3)	9000
Volume (Nm3/ton)	
Price (US/Nm3)	100
Energy Cost (US\$/kW) 0,15	
Gas Enrichment <input type="checkbox"/> Yes	

Figura 5.3 – Interface de entrada das fontes de energia no modelo.

5.2.2.2 – Saídas de Calor

Para saídas de calor do sistema, consideraram-se os seguintes itens:

- Calor de aquecimento do sínter produzido;
- Calor das reações endotérmicas;
- Calor dos gases produzidos;
- Calor de aquecimento do ar de entrada;

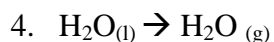
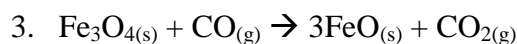
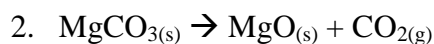
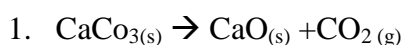
E. Perdas Térmicas do sistema;

A – Calor de Aquecimento do Sínter Produzido

Toda carga metálica e fundentes são alimentados no sistema à temperatura ambiente, porém, com possibilidade de alteração. O calor de aquecimento é calculado a partir dos coeficientes de entalpias de cada elemento, da massa alimentada e do intervalo entre a temperatura de alimentação e final de processo.

B – Calor das Reações Endotérmicas

O calor das reações endotérmicas foi estabelecido a partir do cálculo da entalpia padrão de cada reação e do número de moles presentes de cada substância. As reações endotérmicas consideradas foram⁽³⁰⁾:



C – Calor dos Gases Produzidos

Calor de aquecimento dos componentes H₂O, O₂, CO₂ e CO do gás de topo da sinterização. A temperatura da chaminé (dado de entrada) foi a utilizada como referência para o cálculo da entalpia. A composição química do gás configura-se como um dado de entrada por ser uma particularidade de cada usina.

D – Calor de Aquecimento do ar de Entrada

Por se tratar de um processo de queima por sucção de ar, faz-se necessário a quantificação do calor necessário para aquecer esse ar que está sendo sugado para queimar a carga. Considerou-se composição química padrão do ar (79% N₂ e 21% O₂), temperatura de referência e quantidade de oxigênio calculado a partir do mínimo necessário para queima da massa de carbono no processo.

E – Perdas Térmicas do Sistema

Assim como todo processo industrial, a sinterização não possui eficiência térmica de 100%, ou seja, nem toda energia de entrada é convertida na saída do processo. No caso aqui estudado, as perdas térmicas foram calculadas como a diferença simples entre entrada e saída⁽²³⁾.

$$\text{ENTRADA DE CALOR} - \text{SAIDA DE CALOR} = \text{PERDAS TÉRMICAS}$$

5.2.3 – Estimativa do Cálculo do Consumo Energético

A estimativa do consumo energético necessário nos ventiladores tem como premissa o tamanho médio alimentado que influenciará a fração de vazios do leito. A figura 5.4 mostra a rotina de cálculo utilizada.

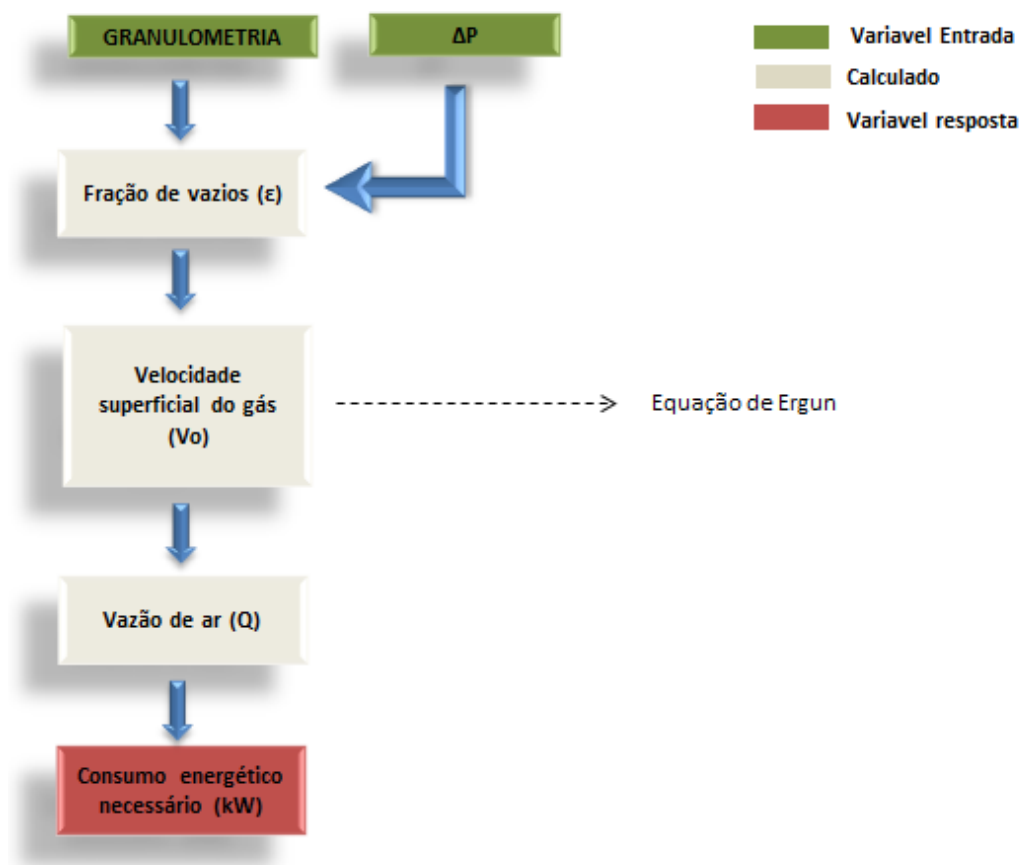


Figura 5.4 - Rotina de cálculo para estimativa do consumo energético influenciado pela granulometria alimentada.

No processo de sinterização, o valor do ΔP é normalmente um dado conhecido. Portanto, no modelo proposto decidimos deixá-lo como dado de entrada.

Primeiro passo, cálculo da velocidade superficial do gás, conforme abaixo ⁽¹⁴⁾:

$$V_o = \frac{-323 \cdot \mu \cdot L \cdot (1-\varepsilon)^2 + \sqrt{4,3,78 \cdot L \cdot \rho \cdot D_p^3 \cdot \Delta P \cdot (1-\varepsilon) \cdot \varepsilon^3 + 323^2 \cdot L^2 \cdot \mu^2 \cdot (1-\varepsilon)^4}}{2,3,78 \cdot L \cdot \rho \cdot D_p (1-\varepsilon)} \quad (\text{eq. 23})$$

Sequencialmente, calcula-se a vazão de ar correspondente ao ΔP alimentado ⁽¹⁶⁾:

$$Q = \frac{V_o}{\rho (1,05 \cdot V_o + 0,6)} \quad (\text{eq. 24})$$

Onde: Q = Vazão de ar (Nm³/min)
 V_0 = Velocidade superficial do gás (m/s)
 ρ = Densidade do gás (kg/m³)

Finalmente, a potência necessária para a vazão de ar calculada será dada pela equação 25:

$$P = \frac{Q_{ar} \cdot \Delta P}{(1000 \cdot n)} \quad (\text{eq. 25})$$

Onde: Q = Vazão de ar (Nm³/min)
 P = Potência necessária para a vazão determinada (kW)
 n = eficiência da instalação

Considerando todas as premissas de cálculos adotadas conforme citado anteriormente, o consumo energético dos ventiladores possui uma variação pelo diâmetro médio conforme figura 5.5.

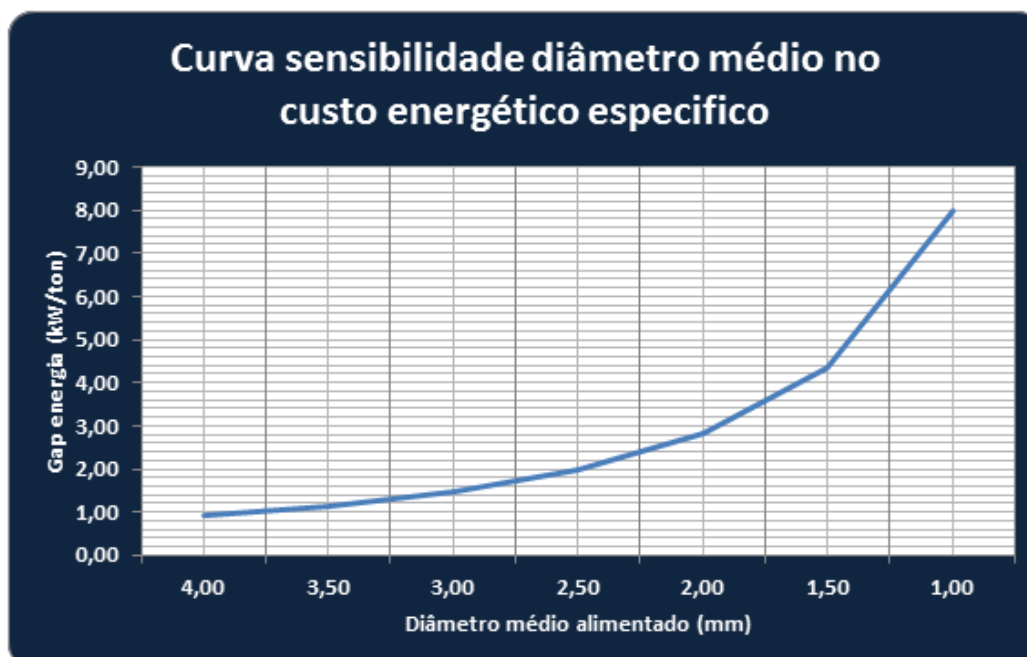


Figura 5.5 - Variação do consumo energético com o diâmetro médio alimentado.

5.2.3.1 - Cálculo dos Espaços Vazios (Void Fraction)

O cálculo para a estimativa dos espaços vazios no leito de sinterização é realizada através da umidade e do diâmetro médio da carga ⁽¹³⁾.

5.3 – Validação do Modelo

Foram utilizados dados de 3 grandes usinas integradas da América do Sul para validação dos principais dados de medição em uma sinterização.

Os parâmetros utilizados validação foram:

- ✓ %Fe;
- ✓ %SiO₂;
- ✓ %FeO;
- ✓ Consumo energético (kWh);
- ✓ Consumo de coke;

Para validação, foi utilizado o desvio entre os resultados de saída do modelo e os dados reais informados pelos operadores de sinterização. Para cada um dos parâmetros considerados foi calculado o erro percentual. Todos os valores estão listados na Tabela VI.1 onde constam estes resultados dos cálculos envolvidos.

Tabela VI.1 - Comparação entre os dados do modelo os dados informados pelos operadores de sinter.

SINTER	RESULTADO	%Fe	%FeO	%SiO2	kWh	Consumo Coke (kg/ton)
A	MODELO	56,04	8,76	6,54	47,71	49,20
	PRÁTICO	56,83	8,35	5,70	47,10	45,40
	Var. (%)	1,39%	4,91%	14,74%	1,30%	8,37%
B	MODELO	56,40	6,57	6,78	40,40	43,10
	PRÁTICO	56,99	7,47	5,80	48,12	47,90
	Var. (%)	4,91%	12,05%	16,90%	16,04%	10,02%
C	MODELO	56,12	5,93	6,50	38,30	42,40
	PRÁTICO	57,44	6,57	6,02	41,10	48,80
	Var. (%)	2,30%	9,74%	7,97%	6,81%	13,11%
D	MODELO	53,60	7,26	5,89		44,10
	PRÁTICO	51,70	7,56	6,63		40,60
	Var. (%)	3,68%	3,97%	11,16%		8,62%

A maior dificuldade na calibração do modelo provém da qualidade das informações recebidas exemplo, análises químicas de insumos ou de produtos incompletas; quantidades de insumos e/ou carga metálica incompletos, além de informações sobre granulometria alimentada e consumo energético não informado; etc. Assim como todo modelo matemático, a qualidade das informações de entrada é essencial para o atingimento dos resultados na saída do modelo.

Os principais pontos a serem avaliados na tabela VI relativos a cada parâmetro são:

- O desvio médio nos teores dos elementos químicos analisados foi, na média, 7,81%. Esses resultados são diretamente influenciados pela qualidade da matéria prima alimentada além da quantidade utilizada. O desvio poderia ser menor já que os valores informados pelas usinas nem sempre têm alta precisão, principalmente relacionados à quantidade dos materiais;
- Os resultados de FeO obtiveram uma variação média de aproximadamente 7,6%. Considerando a baixa qualidade das informações conseguidas, podemos dizer que a política de cálculo adotada foi bem aplicada;

- Os desvios de ferro no sinter produzido ficaram em torno de 3,10%, indicando que o balanço de massa do elemento de maior proporção no processo tem boa precisão. Há uma grande preocupação no fechamento desse balanço, pois o %Fe é diretamente responsável pelo rendimento em massa e metálico tanto da sinterização quanto do alto-forno, processo subsequente;
- Os resultados do consumo energético adotado ficaram com média de 8,0% no desvio. Vale ressaltar que 1 usina das quatro analisadas não informou o consumo. Apesar do médio desvio encontrado, podemos considerar que a política de cálculo adotada consegue ser um bom guia para o impacto da granulometria no consumo energético final;
- Os desvios no consumo de coke ficaram em torno de 10%. As plantas com maiores desvios foram justamente aquelas que não informaram com precisão a qualidade e/ou a quantidade das fontes de energia utilizadas no sistema.

Como resultado final o modelo apresentou desvio de 8,0% entre os dados informados e os resultados alcançados pelo modelo.

5.4 – Estudo de Caso

Como forma de explorar as funcionalidades do modelo de Sinterização, foram realizados alguns estudos de caso que visam ilustrar o potencial desta ferramenta para seu objetivo maior, que é, a propósito, a medição do Valor em Uso das cargas metálicas no processo de sinterização de minério de ferro. Qualquer variável possui propriedades intrínsecas que ao longo do ciclo de produção irá adicionar ou subtrair valor no custo operacional dos ativos, ou seja, no valor final do produto obtido. O resultado líquido e específico da contribuição desta variável no desempenho econômica da operação em relação a uma referência pré-estabelecida é o seu Valor em Uso ⁽¹⁵⁾.

Abaixo, seguem as premissas adotadas para formulação dos estudos de caso:

- As análises químicas das cargas metálicas obedecem às especificações médias adotadas na indústria siderúrgica e de minério de ferro;
- Os parâmetros de processo serão mantidos constantes. São eles: dimensões do forno, propriedades físico-químicas do gás, temperatura final de processo, umidade do ar;
- Os valores de custo das matérias-primas serão meramente ilustrativos porém representando a realidade de mercado. A figura 6.0 representa o preço atual do minério de ferro (finos);
- Foi fixado um enriquecimento de gás natural de 3,0 Nm³/ton para todos os cenários;
- A qualidade química final do sinter produzido não deverá sofrer grandes variações;



Figura 6.0 - Índice de preço atual do minério de ferro fino ⁽³⁶⁾.

Estudo de Caso - A

Objetivo: Comparar o impacto da utilização de diferentes minérios em diferentes proporções.

A figura 6.1 destaca a qualidade química dos minérios utilizados.

		Iron Source					
		Sinter A	Sinter B	Sinter C			
Chemical Analysis	%Fe ₂ O ₃	93,65	90,46	79,49	0,00	0,00	0,00
	%Fe	65,50	63,27	55,60			
	%FeO						
	%SiO ₂	4,24	4,18	10,10			
	%Al ₂ O ₃	0,64	1,30	2,52			
	%CaO	0,09	0,13	1,33			
	%MgO	0,05	0,14	0,24			
	%Mn	0,070	1,090	0,290			
	%P	0,019	0,068	0,067			
	%S						
	%TiO ₂						
	%H ₂ O	1,00	1,00	1,00			
	%LOI	1,05	2,04	5,50			
Diâmetro médio (mm)		1,00	1,50	2,50			
Load Temperature (°C)		25					
Price (US\$/ton)		59,21	57,16	56			

Figura 6.1 - Análise Química da carga metálica utilizada no estudo de caso.

Os resultados de valor em uso serão apresentados baseados nos preços nominais dos insumos.

Foram construídos e analisados 5 cenários diferentes, conforme figura 6.2, além do cenário referência que, no modelo proposto, chamamos de cenário base.

Cenários	Base	1	2	3	4	5
% Sinter A	40	50	60	50	60	20
% Sinter B	30	30	30	20	10	20
% Sinter C	30	20	10	30	30	60

Figura 6.2 - Cenários para estudo de caso.

Nos cenários 1 e 2, aumentou-se a participação do sinter A em substituição ao sinter C, enquanto que nos cenários 3 e 4, aumentou-se a participação do sinter A em substituição ao Sinter B. Já no cenário 5, substituíram-se os sinters A e B pelo C.

Em primeiro lugar, na tabela VI.2 segue o resultado de todos os cenários juntos:

Tabela VI.2 – Relatório de valor em uso com o resultado dos cenários analisados.

OUTPUT												
Variable Cost	1		2		3		4		5		6	
	Base Scenario		Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3		Scenario 4		Scenario 5	
Iron Source	U/t	US\$/t _{sinter}	U/t	US\$/t _{sinter}	U/t	US\$/t _{sinter}	U/t	US\$/t _{sinter}	U/t	US\$/t _{sinter}	U/t	US\$/t _{sinter}
Sinter A	0,54	31,77	0,63	37,25	0,72	42,35	0,64	37,81	0,73	42,94	0,30	17,71
Sinter B	0,40	22,86	0,38	21,72	0,37	21,15	0,26	14,86	0,13	7,20	0,31	17,72
Sinter C	0,40	22,40	0,26	14,56	0,12	6,72	0,38	21,28	0,38	21,28	0,92	51,52
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sub-Totals		77,03		73,53		70,22		73,95		71,42		86,95
Fluxing Agents	Fluxing Agents		Fluxing Agents		Fluxing Agents		Fluxing Agents		Fluxing Agents		Fluxing Agents	
LIMESTONE	0,12	1,08	0,12	1,08	0,12	1,08	0,12	1,08	0,12	1,08	0,12	1,08
DOLOMITA	0,10	0,90	0,10	0,90	0,10	0,90	0,10	0,90	0,10	0,90	0,10	0,90
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CAL	0,07	12,60	0,07	12,60	0,07	12,60	0,07	12,60	0,07	12,60	0,07	12,60
SERPENTINITO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Coque SOL	0,04	8,84	0,04	8,84	0,04	8,84	0,04	8,84	0,04	8,84	0,04	8,84
ANTRACITO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sub-Totals		23,42		23,42		23,42		23,42		23,42		23,42
Solid Fuels	Solid Fuels		Solid Fuels		Solid Fuels		Solid Fuels		Solid Fuels		Solid Fuels	
A	0,04	8,81	0,04	8,81	0,04	8,81	0,04	8,81	0,04	8,81	0,04	8,81
		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00
		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00
Sub-Totals		8,81		8,81		8,81		8,81		8,81		8,81
Ignition Gas	Ignition Gas		Ignition Gas		Ignition Gas		Ignition Gas		Ignition Gas		Ignition Gas	
BLAST FURNACE GAS (BFG)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
COKE OVEN GAS (COG)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NATURAL GAS	0,00	0,30	0,00	0,30	0,00	0,30	0,00	0,30	0,00	0,30	0,00	0,30
Sub-Totals		0,30		0,30		0,30		0,30		0,30		0,30
Energy (kW) - Fans	Energy (kW) - Fans		Energy (kW) - Fans		Energy (kW) - Fans		Energy (kW) - Fans		Energy (kW) - Fans		Energy (kW) - Fans	
	45,45	6,82	46,38	6,96	47,53	7,13	45,74	6,86	45,93	6,89	43,25	6,49
TOTAL VARIABLE COST		116,38		113,02		109,87		113,34		110,84		125,96
VIU				-3,36		-6,50		-3,04		-5,54		9,58

Na tabela VI.3, segue a qualidade química do sinter produzido em cada cenário analisado:

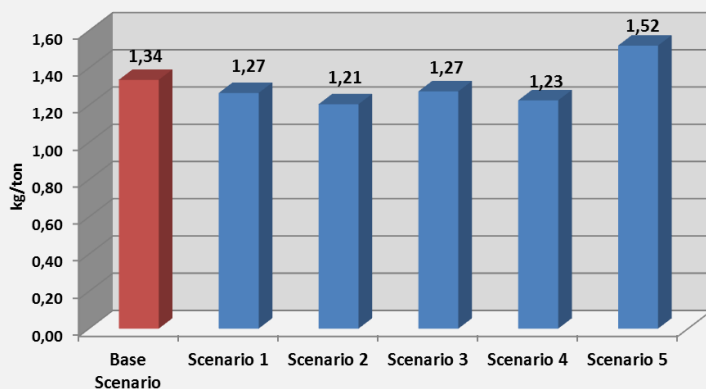
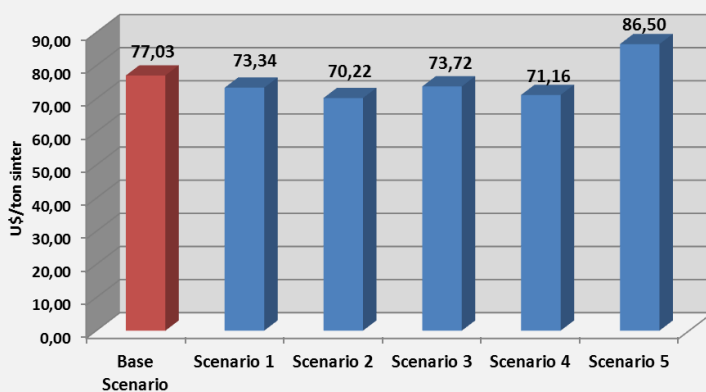
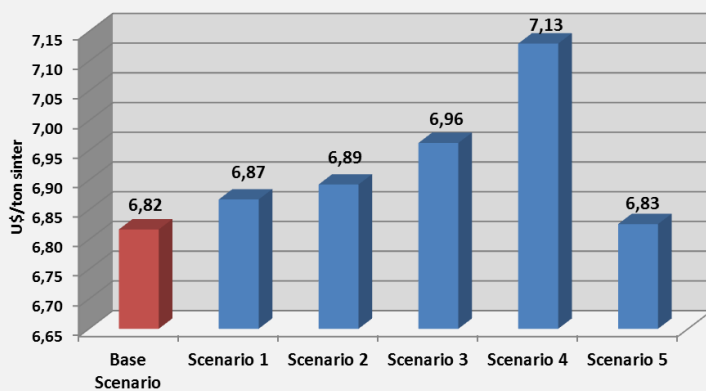
Tabela VI.3 - Qualidade química produzida nos 5 diferentes cenários do estudo de caso A.

Iron Source	Base Scenario		Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3		Scenario 4		Scenario 5	
	U/t	US\$/t _{sinter}	U/t	US\$/t _{sinter}	U/t	US\$/t _{sinter}	U/t	US\$/t _{sinter}	U/t	US\$/t _{sinter}	U/t	US\$/t _{sinter}
<i>Sinter Quality Produced</i>												
% Fe	57,22%		57,01%		56,83%		56,61%		56,01%		57,28%	
% FeO	6,58%		6,59%		6,58%		6,71%		6,83%		6,68%	
% Fe2O3	81,58%		81,26%		80,98%		80,68%		79,80%		81,70%	
% SiO2	5,43%		5,04%		4,63%		5,47%		5,56%		6,53%	
% Al2O3	1,16%		1,04%		0,92%		1,13%		1,12%		1,46%	
% CaO	8,48%		9,12%		9,73%		9,23%		9,92%		7,38%	
% MgO	1,27%		1,36%		1,45%		1,37%		1,47%		1,11%	
% Mn	0,32%		0,31%		0,30%		0,25%		0,19%		0,29%	
% P	0,121%		0,126%		0,130%		0,126%		0,130%		0,113%	
% S	0,03%		0,03%		0,03%		0,03%		0,03%		0,02%	
% TiO2	0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%	
% H2O	0,86%		0,86%		0,85%		0,86%		0,86%		0,88%	
% LOI	0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%	
% C fixo	1,69%		1,84%		1,99%		1,85%		1,98%		1,42%	
B2	1,56		1,81		2,10		1,69		1,78		1,13	

Analisando os resultados dos cenários realizados, podemos destacar os seguintes pontos:

- O cenário que apresentou menor utilização de minério por tonelada de sinter foi o 2, onde a participação do minério de maior teor de ferro é mais alta;
- O cenário com o menor custo energético foi o cenário 5 que possui a maior participação do minério de maior granulometria média;
- Apesar do maior custo energético apresentado, o cenário 2 foi o que apresentou melhor valor em uso comparado ao cenário base;
- Considerando os cenários simulados, o minério C é o que possui menor custo de aquisição, porém, seu baixo teor de ferro faz com que sua utilização seja maior, aumentando o custo específico de produção do sinter;

A figura 6.3 mostra gráficos (relatório do modelo) comparativos de todos os cenários analisados.

CARGA METALICA (kg/ton sinter)**CUSTO MINÉRIO (U\$/ton sinter)****CUSTO ENERGIA (U\$/ton sinter)**

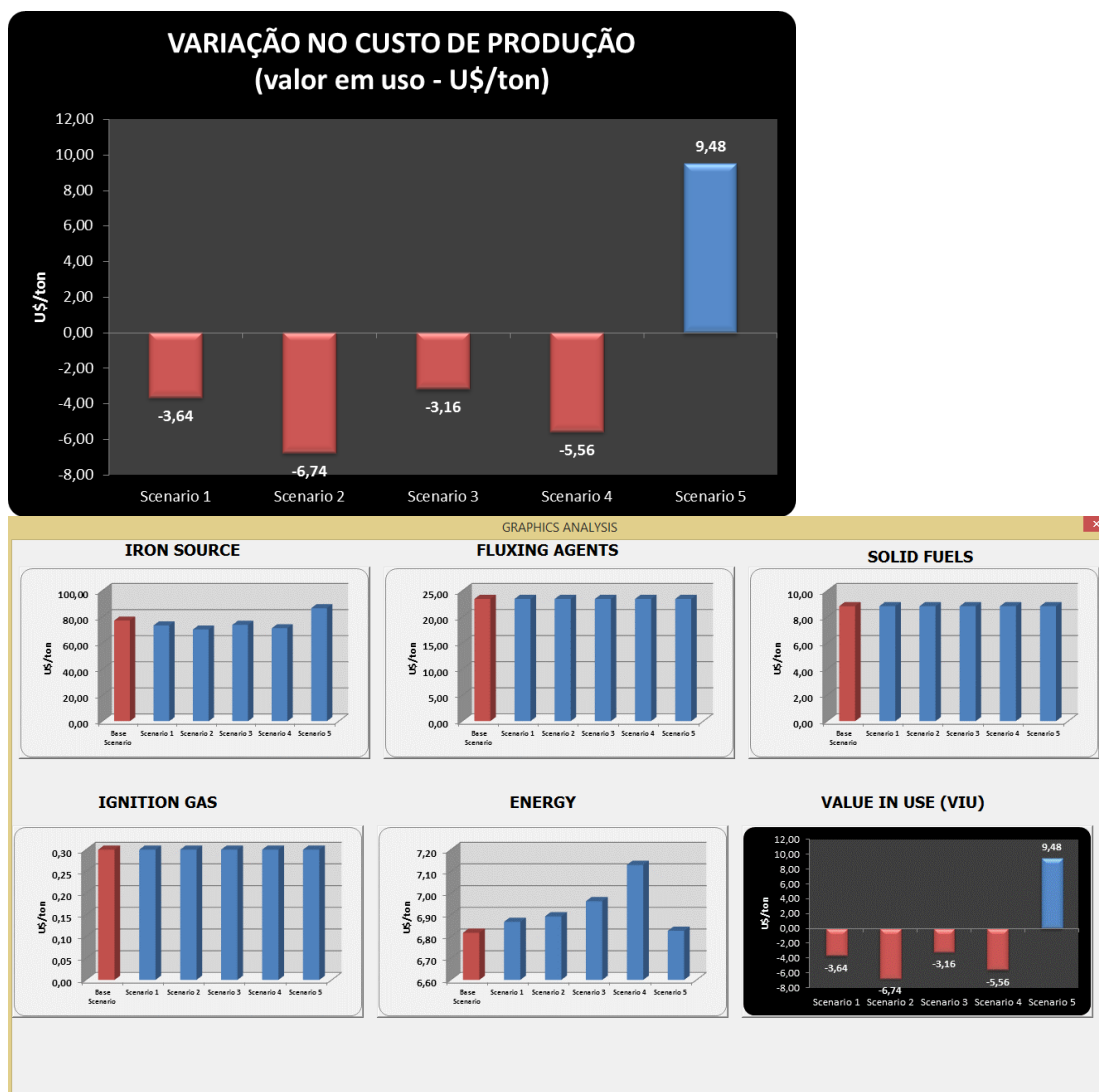


Figura 6.3 – Gráficos dos principais resultados dos cenários discutidos.

Estudo de Caso - B

Uma segunda forma de explorar as funcionalidades do modelo, diz respeito ao cálculo de um possível ponto de equilíbrio (PE) na utilização de um determinado minério. Por motivos de redução de custo, é comum a área de produção ser obrigada a utilizar determinado minério com qualidade pior e, conseqüentemente, muito mais barato. No estudo abaixo, calculamos o máximo que poderia ser utilizado desse minério sem aumentar o custo de produção final comparado ao cenário base, ou seja, o normalmente utilizado na empresa.

Na análise, o critério para definição de minério de pior qualidade é o teor de ferro. Utilizamos dois minérios com teor de ferro bem distintos. Os cenários considerados estão descritos na tabela VI.4:

Tabela VI.4 - Cenários para cálculo do ponto de equilíbrio.

Cenários	%Fe	Preço (U\$/ton)	Base	1	2	3	4	5
% Sinter A	65,5	60	100	99	97	95	93	91
% Sinter C	55,6	40	0	1	3	5	7	9

A figura 6.4 mostra a qualidade química dos dois minérios utilizados no cálculo do PE.

Chemical Analysis	Iron Source					
	Sinter A	Sinter B	Sinter C			
%Fe2O3	93,65	0,00	79,49	0,00	0,00	0,00
%Fe	65,50		55,60			
%FeO						
%SiO2	4,24		10,11			
%Al2O3	0,64		2,52			
%CaO	0,09		1,33			
%MgO	0,05		0,24			
%Mn	0,070		0,290			
%P	0,019		0,067			
%S						
%TiO2						
%H2O	1,00		1,00			
%LOI	1,05		5,60			

Figura 6.4 - Qualidade química dos minérios utilizados no cálculo do PE minério.

Considerando as variações propostas, foi possível mensurar que o máximo do minério C, cujo preço é aproximadamente 33% menor que o minério A, que poderemos utilizar na produção sem alterar de forma significativa a qualidade química final do sinter está entre 5 e 6%, conforme figura 6.5.

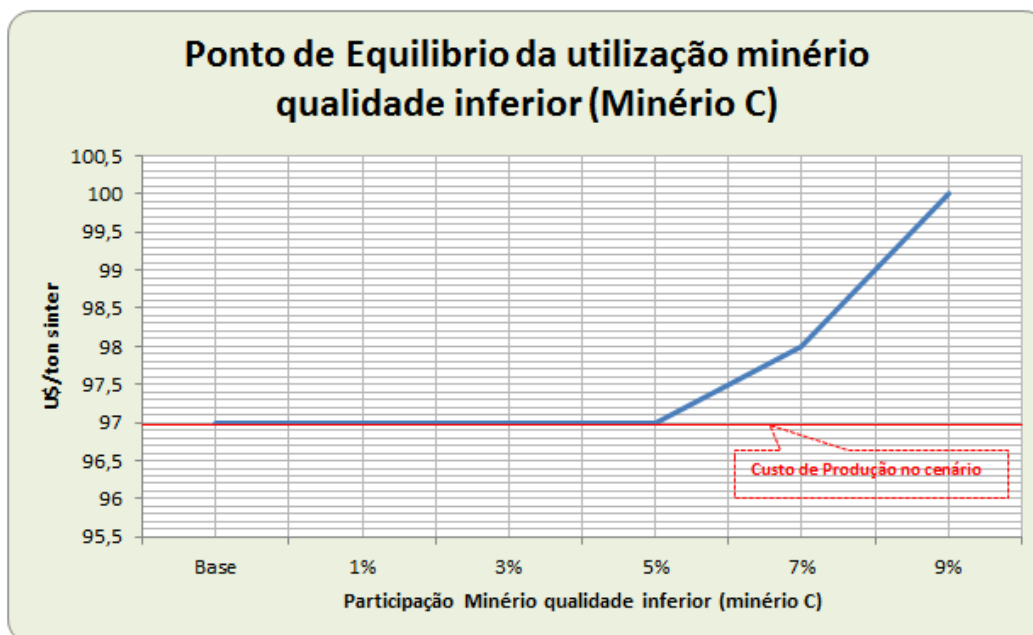


Figura 6.5 - Ponto de equilíbrio da utilização de um minério de baixo teor de ferro.

Estudo de Caso - C

Em outra situação, a usina vê-se obrigado a utilizar no mínimo 50% de um determinado minério, de qualidade química inferior (menor %Fe). Como premissa, utilizamos os mesmos minérios usados no Estudo de Caso B. Nessa análise, calculamos o preço máximo que poderá ser pago no minério sem aumentar o custo de produção final comparado ao cenário base, ou seja, aquele normalmente utilizado na empresa.

Considerando o proposto, o preço máximo a ser pago em um minério com aproximadamente 55% de ferro e com utilização de 50% no leito é de US\$ 34,00/tonelada. Acima desse valor, o custo operacional extrapola o praticado pela usina (cenário base) inviabilizando seu uso.

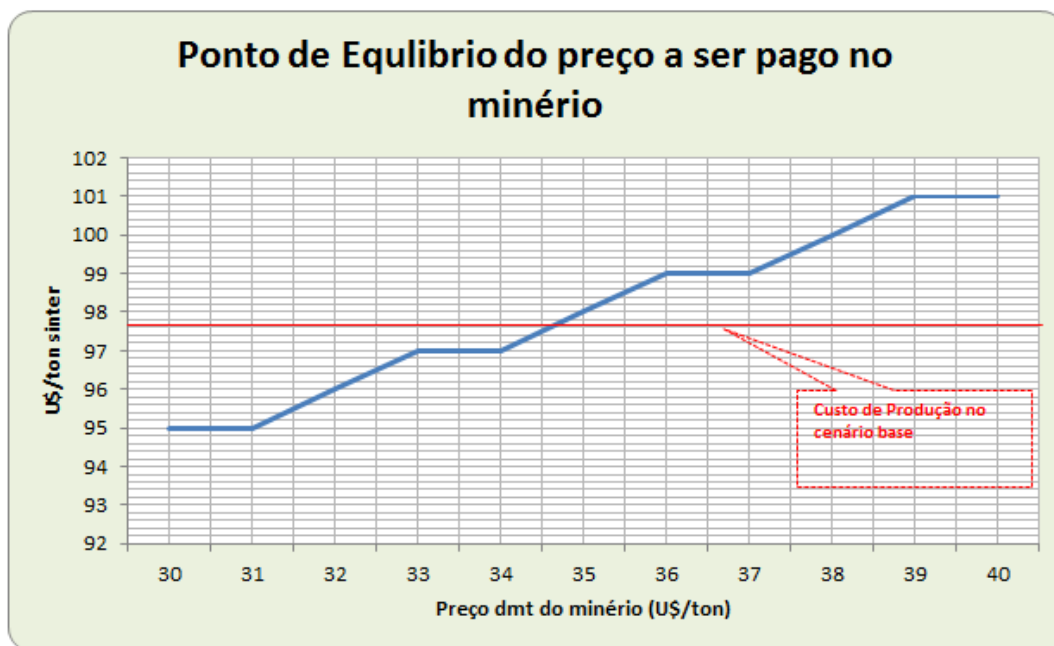


Figura 6.6 - PE do preço máximo a ser pago em um minério na situação proposta.

6. – Conclusões

Em particular, o modelo de Valor em Uso desenvolvido atende as necessidades atuais do processo em avaliar e comparar de forma quantitativa os diversos tipos de qualidade química e granulométrica dos minérios de ferro e seus impactos financeiros no processo de Sinterização. O desvio médio entre os resultados do modelo e os dados práticos reais foi de 8,0%, sendo que muitas das vezes os dados informados correspondem a médias mensais ou anuais do processo, o que, considerando ser um modelo termoquímico, pode influenciar em muito os resultados do modelo.

A ferramenta propiciou o cálculo de um ponto de equilíbrio para qualidade em dois cenários diferentes. No primeiro, mostrou que o máximo de utilização de um minério com qualidade química inferior (teor de ferro 10% menor) e preço 33% menor sem alterar a qualidade final do sinter e o custo final de produção, foi de 5%. No segundo cenário, foi possível verificar que no caso de utilização de no mínimo 50% do mesmo minério de qualidade inferior, o preço máximo a ser pago sem alterar o custo final seria de U\$ 34,00.

Finalmente, podemos concluir que foi construída uma ferramenta para cálculo do impacto financeiro da qualidade do minério no processo de produção do sinter que, a cada dia, ganha mais e mais utilização na indústria siderúrgica e que servirá como vital apoio para um maior embasamento técnico nas negociações comerciais das empresas.

7.0 – Sugestões para Trabalhos Futuros

A continuidade deste trabalho é naturalmente a interligação desse modelo com modelos termoquímicos de Alto-Forno de forma a trabalhar continuamente tendo o custo final do ferro gusa como principal meta.

Em relação ao modelo de sinterização, um enriquecimento que se impõe é a inclusão de um formalismo cinético para os processos. Recomenda-se ainda que sejam incluídas considerações a respeito de impactos na produtividade atribuindo às diferentes distribuições granulométricas dos minérios de ferro.

8.0 – Referências Bibliográficas

1 – WOOD MACKENZIE ANALYTICS BUSINESS. Global Iron Ore Short-Term 2011.

2 – CRU ANALYSIS. Iron Ore Long Term Outlook Statistical Review 2013.

3 – INSTITUTO AÇO BRASIL. Disponível em <<http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>>.

4 – GEERDES, M. et al. Práticas Modernas para Operação de Alto-Forno.pp17 – 28, 2007.

5 – GONDIM, E.P. et al. Manual de Treinamento – Processo de Sinterização. Ouro Branco: Gerdau Açominas, 2007;

6 - MOURÃO, M.B., YOKOJI, A., MALYNOWSKYJ, A., LEANDRO, C.A.S., TAKANO, C., QUITES, E.M.C., GENTILE, E.F., SILVA, G.F.B.L., BOLOTA, J.R., GONÇALVES, M., FACO, R.J., Introdução à Siderurgia, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2007;

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

8 - HONORATO, E.P. Adequação granulométrica das matérias-primas e do sistema de segregação contínua (I.F.S.) para melhorias na produtividade e qualidade do sínter para os altos-fornos. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais 2005. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

9 – DAWSAN, P.R. Recent Developments in Iron Ore Sintering – Part 1 Introduction. Ironmaking and Steelmaking, v.20, pp. 135 – 136, 1993;

- 10 - KASAI, W.J., et al. The Effect of Raw Mixture Properties on Bed Permeability during Sintering, ISIJ International. Vol. 29 (1989), No. 1, pp. 33-42.
- 11 – KASAI, E., et al. The effect of Raw Mixture Properties on Bed Permeability During Sintering. ISIJ Int., 29: 33 – 42.
- 12 – RANKIN, W.J., et al. The Measurement of Void Fraction in Beds of Granulated Iron Ore Sinter Feed, 1985, Trans ISIJ, 25, 1016 – 1020.
- 13 - HINKLEY, A.G., WATERS, J.D. An investigation of pre-ignition air flow in ferrous Sintering, International Journal of Mineral Processing, October 1994, Volume 42, Issues 1-2, Pages 37 – 52.
- 14 – VENKATARAMANA, R., GUPTA, S.S, KAPUR, P.C. A Combined Model for Granule Size Distribution and Cold Bed Permeability in the Wet Stage of Iron Ore Sintering Process, 1998.
- 15 - VENKATARAMANA, R., GUPTA, S.S, KAPUR, P.C. Mathematical Modeling and Simulation of the Iron Ore Sintering Process. Tata Search, 1998.
- 16 – SATO, S., et al. Lower Limit of the Energy Consumption and the Double Ignition Process for Iron Ore Sintering, ISIJ, vol. 28, 1988;
- 17 - WU SHENG-LI, WANG QING-FENG, BIAN MIAO-LIAN, ZHU JUAN, LONG FANG-YI. Influence of Iron Ore Characteristics on FeO Formation During Sintering, Journal of Iron and Steel Research, International. 2011 9 18(5) : 05-10
- 18 – UMADEVI, T., et al. Influence of Magnesia on Iron Ore Sinter Properties and Productivity, Ironmaking and Steelmaking, Vol. 36, 2009;
- 19 – LESSA, A.M. Avaliação do Valor em Uso de Cargas Ferríferas para Alto-Forno. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2009. 124p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia

Metalúrgica e Materiais).

20 - ARAÚJO, D. R. Desenvolvimento de um modelo computacional de otimização e predição do Valor em Uso de pelotas de minério de ferro na rota redução direta – aciaria elétrica. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2007. Tese de Doutorado.

21 - KATRAK et al. – Assessing the value of alternative irons. *New Steel*, February, 1995, p. 22-24.

22 - DOMINGUEZ S. V. O Valor Percebido como Elemento Estratégico para Obter a Lealdade dos Clientes.

23 - DE CASTRO, L.F.A; TAVARES, R.P.; SAMPAIO, R.S.; (2004) Apostila Termodinâmica Metalúrgica, Escola de Engenharia da UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

24 - PEREIRA, H.C. Avaliação em escala piloto do comportamento dos produtos pellets feed, pellet screenings e micro pellet em substituição ao sinter feed em uma mistura de sinterização. 2004. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

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

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

27 - LOPES, M.V; Caracterização de Sinter de Minério de Ferro para Uso em Altos-Fornos a Carvão Vegetal. 2012. 99f. Dissertação (Mestrado Profissional) Universidade Federal de Itajubá.

28 - DE ARAÚJO, L. A. Manual de siderurgia. 1o volume. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997.

29 - BÖLÜKBAŞI, TUFAN, BATAR and ALTUN, The Influence of Raw Material Composition on the Quality of Sinter, Nat Sci 2013;11 (9):37-47]. (ISSN: 1545-0740).

30 - ZHANG I UN , GUO XING-MIN, HUANG XUE-JUN, Effects of Temperature and Atmosphere on Sintering Process of Iron Ores, Journal of Iron and Steel Research, International. 2012. 19(10): 01-06

31 - A. FORMOSO, A. MORO, G. FERNA'NDEZ PELLO, J. L. MENE'NDEZ, M. MUN'IZ AND A. CORES. Influence of nature and particle size distribution on granulation of iron ore mixtures used in a sinter strand, Ironmaking and Steelmaking 2003 Vol. 30 No. 6 447

32 - HIROSHI OBATA, HIROYASU TAKAHASHIM, ASARU NAKAMURA1T), KOMAMURA. High Productivity Operation at Chiba N0.4 Sinter Plant, ISIJ International. Vol. 31 (1991), No. 5, pp. 478-486.

33 - DE CARVALHO, J.L.R; ASSIS, P.S.; CAMILO, R.D.; FIGUEIRA. R.M.; CAMPOS, V.F.; (1977) Dados Termodinâmicos para Metalurgistas, Escola de Engenharia da UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

34 – LEOCADIO, L.G.E. Análise Econométrica do Comportamento dos Preços do Minério de Ferro no Mercado Mundial; Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral), 2014, Universidade Federal de Ouro Preto.

35 – GONÇALVES, C.G.; SOUZA, R.P. Estratégia de Marketing para Diferenciação e Posicionamento do Produto/Serviço no Mercado; Diálogos & Saberes, Mandaguari. Vol. 11 (2015), No. 1, pp. 29-58.

36 – Vale. Disponível em < <http://www.vale.com/brasil/PT/business/mining/iron-ore-pellets/Paginas/Iron-Ore-Indices.aspx> >.

37 – DOUCE, J.F; Ignition during sintering Incidence on metallurgical results and industrial return of industrial experience; 2009; ArcelorMittal University.