

Dissertação de Mestrado

“Efeito do Tipo de Carvão Injetado nas Ventaneiras do Alto-Forno no Consumo de Combustíveis (*Fuel-Rate*)”

Autor: Mauro Vivaldino Fernandes

Orientador: Prof. Dr. Ing. Varadarajan Seshadri

Setembro/2007

EFEITO DO TIPO DE CARVÃO INJETADO NAS VENTANEIRAS DO
ALTO-FORNO NO CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS (*FUEL-RATE*)

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

Autor : Mauro Vivaldino Fernandes

Orientador: Prof. Dr. Ing. Varadarajan Seshadri

Área de concentração: Metalurgia Extrativa

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2007

A dois anjos muito especiais.

Jéssica e Guilherme.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que colaboraram na preparação deste trabalho, em particular:

- Aos meus pais, Noé e Efigênia, que souberam lapidar minha formação e o meu caráter com maestria. Exemplo maior, sempre;
- A Mirtes, pelo carinho e incentivo e ao Guilherme, pelo sorriso contagiante;
- Aos meus irmãos (Noé, Beatriz e Maria do Rosário) e familiares, pela mão amiga em todos os momentos e, em especial, ao Marcus, pelo incentivo;
- À Usiminas, pela oportunidade da realização deste trabalho e especialmente, aos gerentes Antônio José dos Santos, José de Sousa Carvalho e José Mauro Cota;
- À UFMG, especialmente ao Prof. Dr. Varadarajan Seshadri, pela orientação;
- Aos amigos do Centro de Pesquisas da Usiminas: Luís Augusto Marconi Scudeller, Antônio Alberto Moreira Pinto, Mônica Marques Caetano de Lima e Wilton Pacheco de Araújo, parceiros desta caminhada;
- Aos engenheiros Magno Antônio Calil Resende Silveira e Henriquison Magela Bottrel Reis, pelos ensinamentos, discussões técnicas e orientações, fundamentais neste;
- A engenheira Beatriz Fausta Gandra, pela amizade e apoio. Nos momentos de incertezas, suas palavras de incentivo foram marcantes;
- Ao engenheiro Edilson Pinto Honorato, pelo apoio e incentivo;
- À funcionária Daniela Bonfim Luna, pela ajuda na formatação deste trabalho;
- A todos os meus amigos, pelo apoio e incentivo;
- A Jéssica, pela luta e presença... São muitos os ensinamentos;
- À memória de minha irmã Márcia e ao Ser que nos rege.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVO.....	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1 <i>O PROCESSO DE PRODUÇÃO DE GUSA.....</i>	<i>3</i>
3.1.1 <i>Aspectos Internos do Alto-Forno.....</i>	<i>3</i>
3.1.2 <i>Funcionamento do Alto-Forno.....</i>	<i>4</i>
3.1.3 <i>Transformação da Carga no Alto-Forno.....</i>	<i>7</i>
3.2 <i>INJEÇÃO DE COMBUSTÍVEIS AUXILIARES.....</i>	<i>8</i>
3.3 <i>COMBUSTÃO DO CARVÃO PULVERIZADO.....</i>	<i>9</i>
3.3.1 <i>Fundamentos.....</i>	<i>9</i>
3.3.2 <i>Eficiência da Combustão de Carvão no Raceway.....</i>	<i>11</i>
3.3.3 <i>Avaliação e Cálculo da Eficiência de Combustão.....</i>	<i>13</i>
3.3.4 <i>Otimização da Combustão do Carvão Pulverizado no Raceway.....</i>	<i>14</i>
Aspectos ligados à natureza do carvão.....	14
• <i>Matéria volátil do carvão.....</i>	<i>14</i>
• <i>Taxa de substituição e teor de carbono.....</i>	<i>16</i>
• <i>Umidade.....</i>	<i>17</i>
• <i>Influência dos teores de carbono e de oxigênio do carvão.....</i>	<i>17</i>
• <i>Influência do poder calorífico do carvão.....</i>	<i>18</i>
• <i>Influência do teor de cinza do carvão.....</i>	<i>18</i>
Aspectos ligados às condições operacionais do alto-forno.....	18
• <i>Tamanho de partícula.....</i>	<i>18</i>
• <i>Taxa de carvão/excesso de ar.....</i>	<i>19</i>
• <i>Temperatura do ar soprado.....</i>	<i>19</i>
• <i>Velocidade do ar soprado.....</i>	<i>20</i>
• <i>Enriquecimento de oxigênio.....</i>	<i>21</i>
• <i>Influência da taxa de injeção.....</i>	<i>23</i>
3.4 <i>EFEITOS DA INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO NO ALTO-FORNO.....</i>	<i>23</i>
3.4.1 <i>Aspectos Gerais.....</i>	<i>23</i>
3.4.2 <i>Consumo de Coque: Taxa de Substituição.....</i>	<i>26</i>
3.4.3 <i>Cálculo da Taxa de Substituição na Usiminas.....</i>	<i>33</i>
3.5 <i>METODOLOGIA DE TROCA DE CARVÕES INDIVIDUAIS E/OU MISTURAS INJETADOS NO ALTO-FORNO.....</i>	<i>34</i>
4 METODOLOGIA.....	36
4.1 <i>SELEÇÃO DOS DADOS INDUSTRIAIS.....</i>	<i>36</i>
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
5.1 <i>DADOS OPERACIONAIS DO ALTO-FORNO 3.....</i>	<i>38</i>
5.2 <i>ANÁLISE DOS DADOS E GERAÇÃO DO MODELO.....</i>	<i>38</i>
5.3 <i>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</i>	<i>44</i>
5.4 <i>ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO DO FUEL-RATE QUANDO DA ALTERAÇÃO DO TIPO DE CARVÃO INJETADO.....</i>	<i>47</i>
6 CONCLUSÕES.....	51
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 – Esquema da região interna do alto-forno, mostrando suas várias zonas ⁽¹⁾	4
FIGURA 3.2 – Reações químicas e distribuição de temperaturas de gás e sólidos ao longo da altura de um alto-forno ^(1,2)	6
FIGURA 3.3 – Descrição esquemática da combustão de uma partícula de carvão ⁽⁶⁾	11
FIGURA 3.4 – Desenho esquemático da formação do ninho de pássaro no alto-forno, segundo Steeghs et alii, citado por Carneiro et alii ⁽⁷⁾	12
FIGURA 3.5 – Efeitos do tipo de carvão injetado sobre as condições do ninho de pássaro ^(12, 13)	15
FIGURA 3.6 – Variação da taxa de substituição em função do <i>rank</i> do carvão injetado ⁽¹⁷⁾	16
FIGURA 3.7 – Efeito de C e O na taxa de substituição ⁽¹⁶⁾	17
FIGURA 3.8 – Efeito da temperatura do ar soprado na eficiência de combustão de carvão pulverizado, segundo Suzuki et alii (a) e Ueno et alii (b), citados por Castro et alii ⁽⁵⁾	20
FIGURA 3.9 – Variação da velocidade do ar soprado com o <i>rank</i> do carvão ⁽¹⁸⁾	21
FIGURA 3.10 – Efeito do enriquecimento de oxigênio na eficiência de combustão de carvão pulverizado: (a) segundo Suzuki et alii e (b) para um valor de μ (oxigênio do ar + carvão/oxigênio para queima total) constante, segundo Yamaguchi et alii, citados por Castro et alii ⁽⁵⁾	22
FIGURA 3.11 – Eficiência de combustão do carvão pulverizado em função da relação O_2/C no sopro, segundo Strömquist et alii, citado por Castro et alii ⁽⁵⁾	22
FIGURA 3.12 – Taxa de substituição em função do poder calorífico do carvão, segundo Hutny et alii ⁽¹⁶⁾	27
FIGURA 3.13 – Taxa de substituição em função do poder calorífico do carvão com vários teores de cinza, segundo Hutny et alii ⁽¹⁶⁾	28
FIGURA 3.14 – Relação entre taxa de substituição e taxa de injeção de carvão pulverizado e a influência da temperatura de sopro, volume de escória e cinza do coque, segundo Maki et alii ⁽²⁹⁾	29
FIGURA 3.15 – Relação entre consumo de coque e taxa de injeção, mostrando a taxa de substituição corrigida metalurgicamente, segundo Peters et alii ⁽³⁰⁾	30
FIGURA 3.16 – Relação entre taxa de injeção, taxa de substituição e eficiência de redução na zona de preparação, segundo Yamaguchi et alii ⁽³¹⁾	31
FIGURA 3.17 – Relação entre taxa de substituição e taxa de injeção, segundo Yoshida et alii ⁽³²⁾	32
FIGURA 3.18 – Relação entre taxa de injeção e o consumo de coque corrigido, segundo Maki et alii ⁽²⁹⁾	32

FIGURA 5.1 – Mosaico dos diagramas de dispersão entre a taxa de substituição e as demais variáveis.	40
FIGURA 5.2 – Evolução da variável dependente com as independentes consideradas nas análises múltiplas (a) Taxa de Substituição x Taxa de Injeção; (b) Taxa de Substituição x Carbono; (c) Taxa de Substituição x Poder Calorífico; (d) Taxa de Substituição x Oxigênio.	41
FIGURA 5.3 – Resíduo originado da regressão múltipla do modelo.	42
FIGURA 5.4 – Regressão simples das equações 5.5 (a) e 5.6 (b).	43
FIGURA 5.5 – Comparação entre dados operacionais coletados (Real) e modelos originados para taxa de substituição para o AF3 (Modelo das equações 5.2, 5.5 e 5.6, respectivamente).	45
FIGURA 5.6 – Distribuição dos resíduos das regressões dos modelos.	46
FIGURA 5.7 – Relação entre a taxa de substituição e o poder calorífico (a) e equivalência do aporte térmico para cada kg de <i>fuel-rate</i> (b).	48
FIGURA 5.8 – Regressão simples da taxa de substituição x poder calorífico.	48

LISTA DE TABELAS

TABELA V.1 – Detalhamento dos principais dados utilizados.	38
TABELA V.2 – Valores dos coeficientes de correlação originados pelo mosaico dos diagramas de dispersão.	40
TABELA V.3 – Cálculo da mudança de carvão nos altos-fornos.	50

RESUMO

A injeção de finos de carvão pelas ventaneiras dos altos-fornos é um dos principais meios de redução do custo de produção do gusa e da diminuição da dependência de coque no processo. No alto-forno, busca-se a manutenção de elevadas taxas de injeção de finos de carvão e de produtividade, constituindo-se num grande desafio tecnológico. Quando é necessário alterar a mistura de carvão injetada, um ponto muito importante é conhecer as características da nova mistura para obter a estabilidade do processo, a manutenção da produtividade e redução nos custos de produção do gusa.

O objetivo desse estudo foi avaliar/desenvolver uma metodologia de cálculo da taxa de substituição coque/carvão aplicada aos altos-fornos da Usiminas, correlacionando esses resultados com o poder calorífico (e/ou outras variáveis) dos diversos carvões injetados. Além disso, foi desenvolvido um modelo para estimar a variação no *fuel-rate* em função da taxa de injeção de finos praticada e do poder calorífico dos carvões (ou mistura), quando ocorre alteração do tipo de carvão injetado.

O valor encontrado para a equivalência do aporte térmico para cada kg de *fuel-rate* foi de 5000kcal para cada 1kg no *fuel-rate*. Por exemplo, considerando uma taxa de injeção de 100kg/t de gusa, quando da troca de um carvão com poder calorífico de 7500kcal/kg para outro, de 7700kcal/kg, a variação no *fuel-rate* é de - 4kg/t gusa, ou seja, para uma mesma carga, a taxa de injeção pode ser reduzida em 4kg/t gusa.

Essa correção da variação do *fuel-rate* (*coke-rate*) muito contribui na estabilidade do processo, já que as trocas dos carvões (ou misturas de carvões) injetados, em maior ou menor escala, sempre ocasionam variações na operação (marcha) do alto-forno.

ABSTRACT

Coal injection through of the blast furnaces tuyeres is one of the ways to reduce coke consumption and dependence in the blast furnace process in addition to lowering of cost of production of pig iron. There are increasing trends in achieving high substitution rates of coke through increased rates of coal injection and productivity. This topic has been a great technological challenge and involves different aspects such as coal blending and characterization of blended mixtures and their influence on fuel replacement ratio and achieving process stability, high productivity and reduction in costs.

The objective of the study was to evaluate a methodology for the calculation of the rate of substitution of coke by coal fines in the blast furnaces of Usiminas, Ipatinga, Brazil. The results show that the calorific power of injected coal has a decisive influence on replacement ratio. Besides, a model has been developed considering conditions of the blast furnaces in Usiminas relating variation of fuel-rate with injection rate and calorific power of the coal (or coal blends).

The equivalent value achieved for the thermal input was 5000kcal for each kg in the fuel rate. For example, considering an injection rate of 100kg/t of pig iron, changing the coal with 7500kcal/kg by another, with 7700kcal/kg, the variation in the fuel rate is 4kg/t of pig iron.

This correction in the variation of fuel rate (coke rate) contribute to the stability of process, once the changes of injected coals (or blends) brings operational variations in the blast furnace.

1 INTRODUÇÃO

Na Usiminas, o aumento da produção de gusa nos altos-fornos, associado ao corte da injeção de óleo combustível pelas ventaneiras (1981), acarretou um elevado déficit de coque, possibilitando a implantação dos sistemas de injeção de finos de carvão nos altos-fornos (1993). Busca-se na injeção de altas taxas de carvão pulverizado uma melhor adequação ao balanço de coque e, ao mesmo tempo, redução do custo do gusa e prolongamento da vida útil das baterias de fornos horizontais. A manutenção de elevadas taxas de injeção de finos de carvão e de produtividade no alto-forno constitui-se num grande desafio tecnológico.

Atualmente, muitos fornos são operados com resultados marcantes de injeção de carvão em uma ampla faixa de condições. Entretanto, muitas perguntas relativas ao tipo de carvão, tamanho de partícula, taxa máxima de injeção, temperatura do ar soprado, taxa de enriquecimento de oxigênio, etc., ainda estão sem respostas. Esses questionamentos abrem oportunidades para que esforços de pesquisa sejam envidados para ampliar os conhecimentos sobre os fundamentos e práticas operacionais da injeção de carvão.

Geralmente, os estudos sobre injeção de carvão podem ser realizados através de montagens experimentais ou através de medições *in loco* no *raceway* de alto-forno. As montagens, em escala de laboratório e/ou piloto, procuram levar em consideração as características reais de combustão na ventaneira, ou mais especificamente, na zona do *raceway*, possibilitando um entendimento quantitativo da gaseificação/combustão da partícula de carvão sob condições pertinentes à operação do alto-forno. Essas montagens são complementadas por análises e testes de caracterização física, química e estrutural do carvão, além da caracterização dos produtos gasosos de combustão e do carbono não queimado.

A estimativa da variação do *fuel-rate* quando da alteração do tipo de carvão (ou mistura de carvões) injetado nas ventaneiras do alto-forno, contribui na estabilidade do processo, na manutenção da produtividade e na redução dos custos de produção de gusa.

2 OBJETIVO

Os objetivos deste estudo são: i) desenvolver uma metodologia para o cálculo da taxa de substituição coque/carvão aplicada aos altos-fornos da Usiminas; ii) correlacionar os resultados de taxa de substituição com o poder calorífico (e/ou outras variáveis) dos diversos carvões injetados (ou mistura de carvões) e iii) desenvolver um modelo para estimar a variação no *fuel-rate* em função da taxa de injeção de finos praticada e do poder calorífico dos carvões (ou mistura), quando ocorrer alteração do tipo de carvão injetado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O PROCESSO DE PRODUÇÃO DE GUSA

3.1.1 Aspectos Internos do Alto-Forno

A estrutura interna da carga dos altos-fornos só ficou bem conhecida com as experiências de dissecação, conduzidas inicialmente pelos russos e depois pelos japoneses. Estas experiências constaram do resfriamento de altos-fornos comerciais em condições normais de operação. Os fornos foram resfriados e dissecados. A partir dessas experiências, dividiu-se o alto-forno em cinco zonas distintas, mostradas na figura 3.1. As diversas zonas apresentadas na figura 3.1 podem ser descritas como:

- zona granular, região onde toda a carga se encontra no estado sólido;
- zona de amolecimento e fusão (zona coesiva), região onde os componentes da carga metálica e fundentes iniciam o amolecimento e se fundem;
- zona de gotejamento, onde o metal e a escória, já na forma líquida, escoam em contracorrente com os gases através de um empilhamento de coque parcialmente reagido, localizado logo abaixo da zona coesiva, que fornece coque para a combustão nas ventaneiras (zona ativa) e para o homem-morto (zona estagnante);
- zona do *raceway*, região altamente turbulenta em frente as ventaneiras e onde ocorre a combustão do carbono do coque da zona ativa com o oxigênio do ar soprado. O *raceway* pode ser descrito como uma cavidade formada pelo efeito do jato de ar emergindo da ventaneira, na qual as partículas de coque são circuladas e recirculadas numa alta velocidade. Como a maior parte do coque que entra no forno é consumida e a maior parte dos gases redutores são produzidos no *raceway*, o movimento da coluna de carga e a distribuição dos

gases (portanto o desempenho do forno), são governados em grande extensão pelos parâmetros do *raceway*;

- zona de cadinho, composta pelo empilhamento de coque do homem-morto junto com a escória e gusa depositado no fundo do reator, que serão removidos do forno.

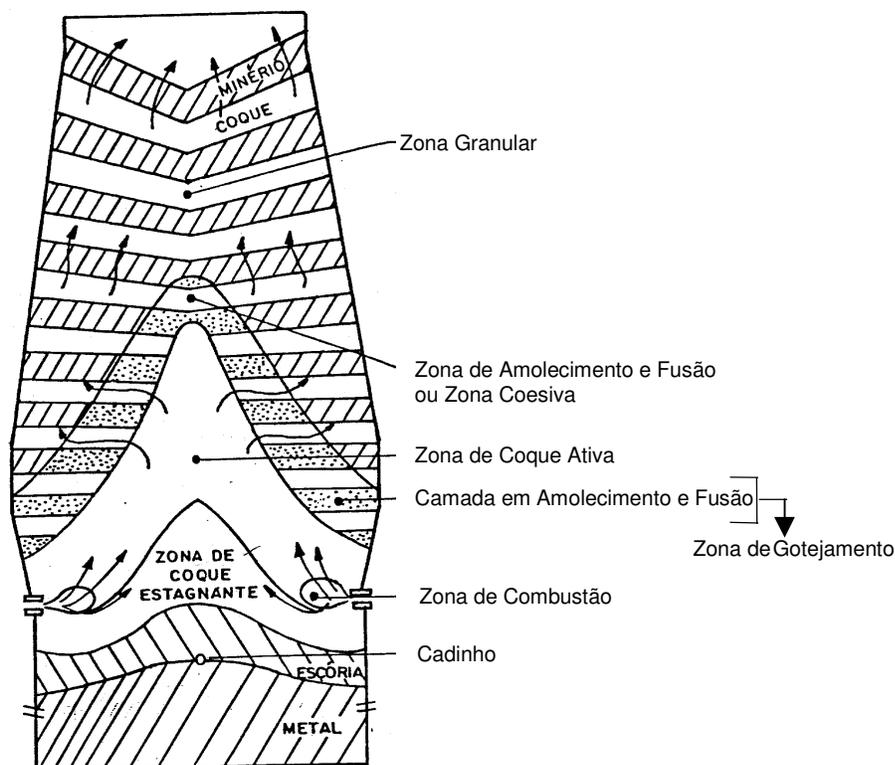


FIGURA 3.1 – Esquema da região interna do alto-forno, mostrando suas várias zonas⁽¹⁾.

3.1.2 Funcionamento do Alto-Forno

Os altos-fornos são reatores para a produção de ferro gusa. O ferro gusa é uma liga obtida no estado líquido, composta de ferro (92 a 95%), carbono (3 a 4,5%) e outros elementos. Como matérias-primas (carga metálica), utilizam-se o sinter, o minério granulado e a pelota. O principal combustível utilizado é o coque metalúrgico. Um esquema geral do funcionamento do alto-forno está representado na figura 3.2 (a).

Todos esses materiais são carregados pelo topo do reator, sendo injetado ar quente na região inferior. O ar quente injetado gaseifica o coque, produzindo o gás redutor CO e

grande quantidade de calor que sobem em direção ao topo em contra-corrente à descida da carga, proporcionando o aquecimento, a redução e a fusão da carga metálica. Como combustível auxiliar é utilizado finos de carvão mineral, injetado junto com o ar quente.

Além do ferro gusa são obtidos como resíduos: escória, pó, lama e gás de alto-forno.

O ar pré-aquecido, a temperaturas da ordem de 1200°C, é soprado pelas ventaneiras do alto-forno e entra em contato com o coque na zona do *raceway*. O contato do oxigênio do ar com o carbono do coque aquecido a 1500°C, provoca inicialmente a reação de formação do dióxido de carbono (CO₂). Essa reação, altamente exotérmica, produz grande quantidade de calor para o processo. O dióxido de carbono reage imediatamente com carbono do coque formando monóxido de carbono (CO), segundo a reação de *solution loss* ou *Boudouard* ($C_{(s)} + CO_{2(g)} = 2CO_{(g)}$), altamente endotérmica. A umidade (H₂O) contida no ar soprado reage com o carbono do coque, gerando os gases redutores CO e H₂. Embora essas reações sejam endotérmicas, ou seja, ocorram com absorção de calor, o resultado efetivo associado à saída de gases redutores do *raceway* é o aporte de grandes quantidades de calor para a seqüência do processo, gerando temperaturas de chama superiores a 2000°C. Durante o restante do seu trajeto no forno, o gás ascendente suprará calor para as camadas de carga metálica descendentes, deixando o topo do forno com temperaturas da ordem de 100 a 150°C.

Devido às necessidades diferenciadas de calor para uma série de reações químicas que ocorrem em vários níveis do forno, o perfil de temperaturas assume uma forma característica: uma zona superior de pré-aquecimento (0-800°C) separada de uma zona inferior de fusão (900-1500°C), por uma zona vertical de reserva térmica cuja temperatura situa-se na faixa de 800-1000°C. A zona de reserva térmica, na qual ocorre muito pouca troca de calor entre gás e sólidos, chega a ocupar 40 a 50% da altura total do forno. Os perfis de temperatura sólido e gás, e o de redução (proposto por Bülter e Klitzing) são mostrados na figura 3.2 (b)⁽²⁾.

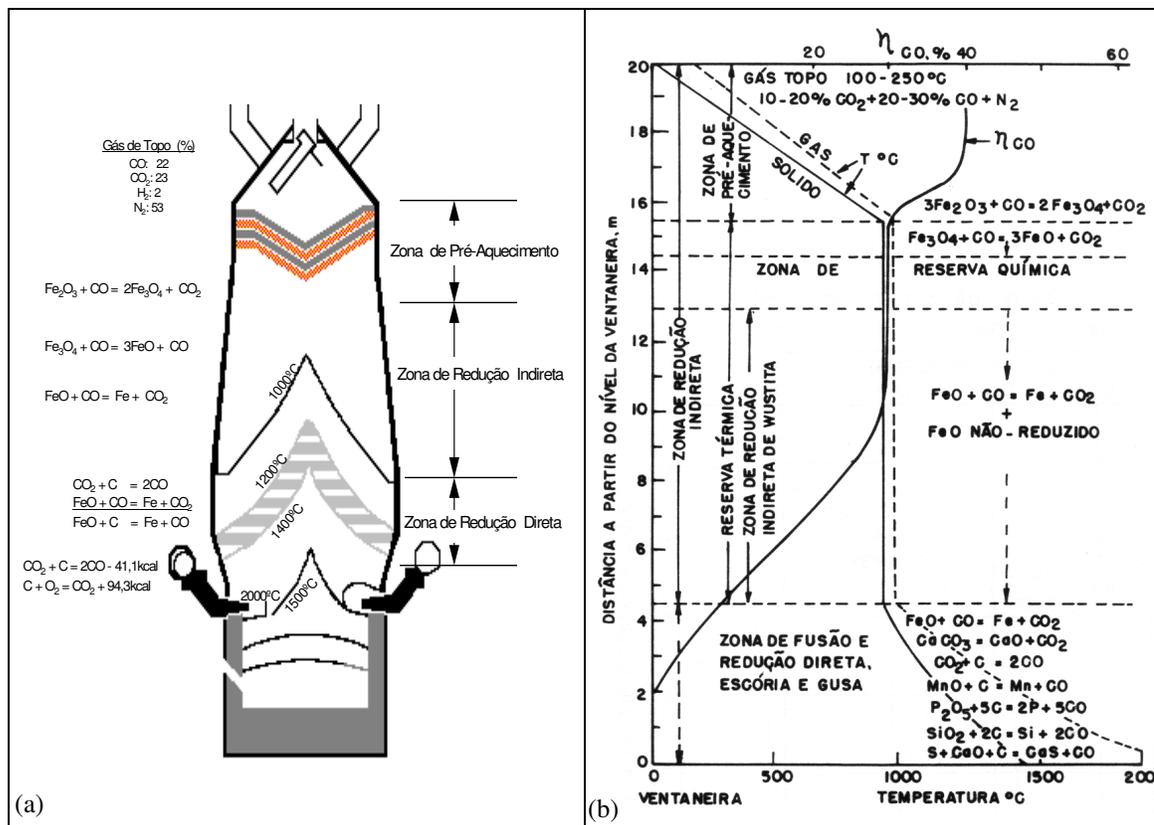
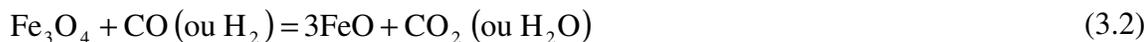


FIGURA 3.2 – Reações químicas e distribuição de temperaturas de gás e sólidos ao longo da altura de um alto-forno^(1,2).

A natureza do processo de contra-corrente permite que um gás altamente redutor (teor elevado de CO) entre em contato com a wustita, que apresenta o menor potencial de oxigênio dos três óxidos de ferro, e, posteriormente, com que a hematita e magnetita sejam reduzidas, na zona superior, por um gás de menor potencial redutor. Sendo o CO_2 o produto final da combustão do carbono, a utilização das energias térmica e química do carbono será tão mais completa, quanto maior a quantidade de oxigênio removida pelas reações 3.1 a 3.3. Essas reações são chamadas de redução indireta, sendo a reação global medianamente exotérmica. Se alguma wustita permanece não reduzida, ela é posteriormente reduzida por redução direta na região onde as temperaturas excedem a 1000°C, como pode ser visto na figura 3.2 (b).



3.1.3 Transformação da Carga no Alto-Forno

O alto-forno é um trocador à contra-corrente. Uma corrente descendente de material frio e oxidado (sinter, pelota e minério de ferro) é aquecida e reduz ao contato de uma corrente ascendente de gás redutor quente. Os materiais oxidados (Fe_2O_3) geram um produto reduzido: o gusa. O gás redutor ($\text{CO} + \text{H}_2$) gera o gás do topo parcialmente oxidado em $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

O gás de rampa de alta temperatura, produzido na zona de combustão (região das ventaneiras), provoca o aquecimento da carga, reações de decomposição e redução dos óxidos durante sua elevação no alto-forno.

Resulta que a temperatura do gás diminui gradativamente, ao mesmo tempo que sua composição química se altera. Primeiramente, a carga sofre a evaporação da umidade e o pré-aquecimento nas proximidades do nível de carga. A medida que a carga desce, ocorre a redução dos óxidos de ferro.

Na zona de amolecimento e fusão, na região da cuba inferior e ventre, iniciam-se o amolecimento e a fusão da carga, que se desenvolvem até atingir o cadinho.

O gusa e a escória armazenados no cadinho são retirados pelos furos de corrida, em intervalos de tempo controlados.

Na região das ventaneiras, o coque à medida que vai sendo queimado, diminui de tamanho gradativamente. Em conjunto com a fusão dos materiais que compõem a carga, provoca um abaixamento do nível da mesma no interior do alto-forno, havendo então a necessidade de um novo carregamento no topo ⁽³⁾.

3.2 INJEÇÃO DE COMBUSTÍVEIS AUXILIARES

O coque é considerado o permeabilizador da carga do alto-forno. Este papel não pode ser assumido por nenhum outro combustível, pois o coque é o único material capaz de manter a permeabilidade do leito ao gás ascendente, bem como a da escória líquida e metal quente descendentes. O coque permanece sólido nas condições de altas temperaturas reinantes no forno e mantém níveis de resistência às diferentes solicitações que sofre no interior do forno. Isso permite com que ele mantenha tamanho e distribuição de tamanhos adequados a uma boa permeabilidade, sem a qual a fabricação de gusa em alto-forno seria impossível.

Entretanto, os papéis térmico e químico podem ser exercidos, em parte, por outros combustíveis líquidos (óleo combustível de petróleo e alcatrão de carvão mineral), gasosos de alto poder calorífico (gás redutor, gás natural e gás de coqueria) ou sólidos (principalmente, carvão mineral), injetados pelas ventaneiras do forno. Assim, esses combustíveis auxiliares também participam como fontes de calor e de gás redutor para o processo.

A implementação industrial da técnica de injeção de combustíveis auxiliares foi iniciada nos anos 60, com ênfase, principalmente na injeção de óleo combustível de petróleo. As crises de petróleo, na década de 70, levaram à busca de fontes alternativas de energia e a estudos mais intensivos da técnica de injeção de combustíveis auxiliares no alto-forno. Os carvões não utilizados na fabricação do coque de alto-forno, com preços comparativamente mais baixos do que os coqueificáveis, passaram a ser o foco no desenvolvimento das técnicas de injeção de combustíveis.

A partir do início da década de 80, a técnica de injeção de carvão foi aperfeiçoada, sendo implantada em todos os grandes altos-fornos. As principais razões para a adoção dessa técnica são:

- como o carvão causa uma menor redução na temperatura adiabática de chama por unidade de injetante do que o óleo ou gás natural, ele permite taxas de injeção mais altas e conseqüentemente, *coke-rates* mais baixos para condições dadas;

- em empresas que possuem déficit de coque é mais interessante, do ponto de vista econômico, adquirir carvão e prepará-lo para a injeção em relação à compra de coque;
- a injeção contribui para o aumento da vida útil das baterias de coque, em virtude de uma menor demanda de coque;
- a grande disponibilidade de carvões para injeção tende a promover um mercado mais estável e com preços mais favoráveis em relação a outros combustíveis injetáveis;
- a injeção viabiliza o alcance e controle da temperatura ótima de chama. Devido ao seu efeito refrigerante, o carvão injetado causa um abaixamento da temperatura de chama, permitindo diminuir sensivelmente o vapor injetado e aumentar o enriquecimento do ar com a temperatura de sopro maximizada. A conjunção de todos esses fatores minimiza o consumo de combustíveis e aumenta a produtividade do forno;
- possibilidade de trabalhar com taxas de injeção mais elevadas, se comparado a outros hidrocarbonetos injetáveis. Isto ocorre porque o carvão causa uma menor queda na temperatura de chama, permitindo o alcance de maiores taxas de injeção.

3.3 COMBUSTÃO DO CARVÃO PULVERIZADO

3.3.1 Fundamentos

A combustão é um conjunto de reações físico-químicas que se produzem ao curso da oxidação completa ou parcial de um combustível pelo elemento oxidante. Os combustíveis na maioria das vezes, como no caso do carvão em sua porção orgânica, são compostos unicamente de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre. O comburente é, geralmente, ar ou oxigênio puro, mas pode também ser H₂O e CO₂. O

termo combustão é mais adotado no caso da combustão viva, em que a oxidação é exotérmica e o fenômeno se torna sensível pela presença de uma chama que constitui a fonte de calor ⁽⁴⁾.

Quando o carvão é injetado no *raceway* através do conjunto algaraviz-ventaneira, o sistema de combustão no alto-forno torna-se muito mais complexo se comparado com a operação *all-coke*. A combustão de carvão é, por sua natureza, um processo multi-estagiado complexo:

“Uma partícula de carvão ao deixar a lança de injeção entra no algaraviz, absorve calor do ar quente e começa a desvolatilizar-se e queimar-se. Esse processo, iniciado no algaraviz, deve ser completado dentro do *raceway* ou irá causar um aumento do *fuel rate*, dificuldades operacionais, e conseqüentemente baixa produtividade do forno. Os produtos da combustão incompleta (*char* não queimado e fuligem) podem bloquear o *raceway*. Isso diminui a permeabilidade da carga e aumenta o carbono carregado tanto para as instalações de limpeza de gás quanto para a escória. A redução de permeabilidade da coluna central de coque é particularmente negativa, podendo causar distribuição periférica não desejada do fluxo de gás, similar a uma zona coesiva do tipo W, resultando em baixa produtividade e perda de calor pelas paredes.”⁽⁵⁾ Este mecanismo de combustão de uma partícula de carvão é mostrado esquematicamente na figura 3.3⁽⁶⁾.

Como pode ser visto, a combustão do carvão, como processo físico-químico, pode ser dividida nas seguintes etapas: (i) desgaseificação e ignição da matéria volátil; (ii) queima dos materiais voláteis e (iii) queima do carvão restante (*char*). Dependendo do tamanho da partícula, composição do carvão, taxa de aquecimento e da quantidade de oxigênio disponível para a combustão, as etapas acima descritas podem ocorrer em seqüência, simultaneamente ou isoladamente.

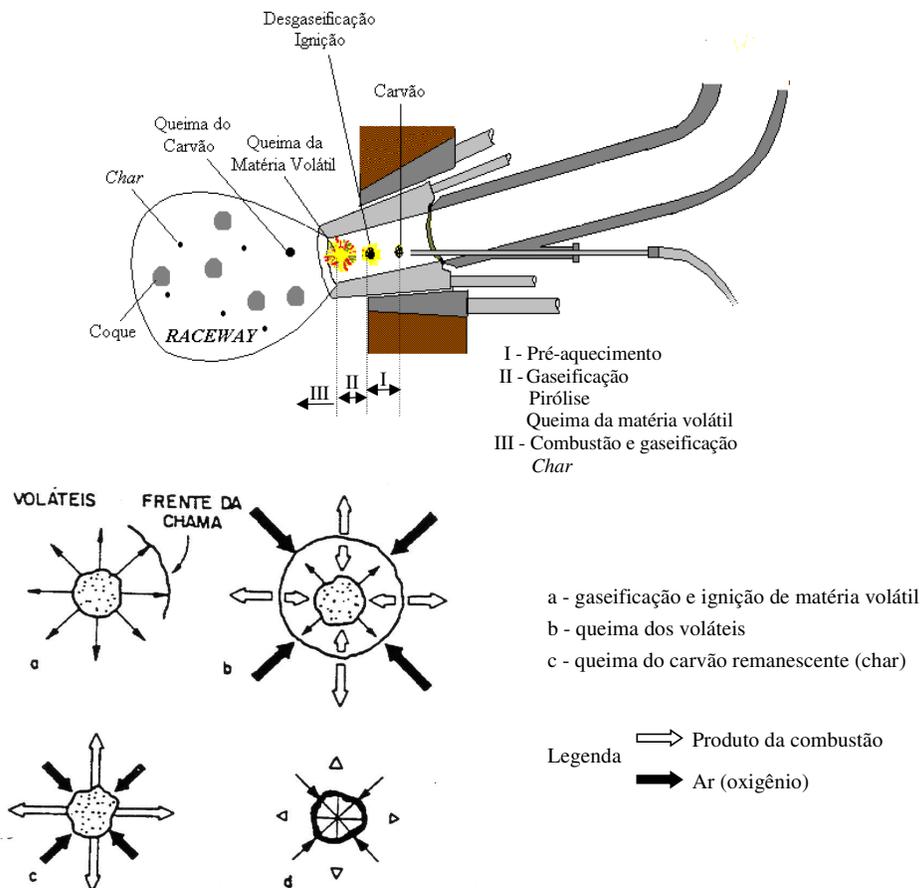


FIGURA 3.3 – Descrição esquemática da combustão de uma partícula de carvão ⁽⁶⁾.

3.3.2 Eficiência da Combustão de Carvão no *Raceway*

A combustão completa do carvão no *raceway* é bastante improvável, por questões ligadas à cinética do processo, principalmente quando se injeta taxas elevadas de carvão no alto-forno. O problema passa, então, a ser o que ocorre com a parcela de carvão não totalmente queimada no *raceway* e que permanece no interior do forno. Para se discutir com maior propriedade tal assunto, torna-se necessário conhecer aspectos ligados ao fenômeno de formação do *bird's nest* (ninho de pássaro) no processo (figura 3.4). O ninho de pássaro é uma região existente no final do *raceway*, composta por finos de coque, carvão e gotas de metal e escória, formando uma região altamente impermeável à penetração dos gases no homem morto e que pode afetar o desempenho do forno ao proporcionar uma distribuição imperfeita dos gases nas suas regiões inferiores. Um aumento muito acentuado da espessura do *ninho de pássaro* aumenta a inatividade do homem morto, diminui a penetração da zona de combustão e favorece o fluxo periférico

dos gases (aumentando as perdas térmicas). Tudo isso é agravado quando se opera com um alto volume de escória, o que causa um aumento de líquido acumulado no homem morto.

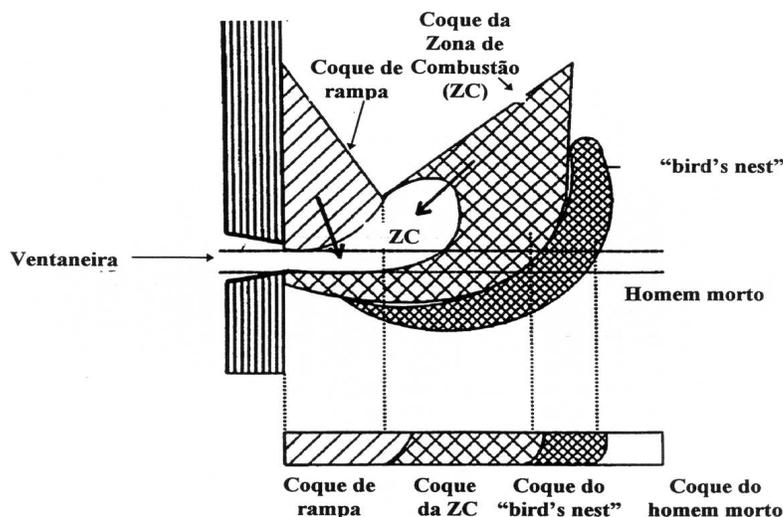


FIGURA 3.4 – Desenho esquemático da formação do ninho de pássaro no alto-forno, segundo Steeghs et alii, citado por Carneiro et alii ⁽⁷⁾.

Qualquer geração de finos no *raceway* contribui para a formação ou agravamento da situação do “ninho de pássaro”. Considerando somente esse aspecto, a utilização de carvão mais grosso poderia ser desaconselhável, por favorecer uma pior condição de queima. Contudo, estudos mais detalhados sobre a constituição do “ninho de pássaro” mostram que o principal material a se degradar no *raceway* é o coque, não tendo sido encontrada quantidade significativa de finos não queimados provenientes do carvão injetado. De fato, a maior reatividade do carvão desvolatilizado (*char*) faz com que ele seja consumido pelo CO_2 , preferencialmente em relação ao coque, que terá seu tempo de residência na região aumentado e, através das ações mecânicas de colisão entre as partículas, poderá degradar-se e gerar mais finos.

Nesse contexto, a eficiência de combustão do carvão pulverizado afeta significativamente o desempenho operacional do alto-forno. A existência de uma maior quantidade de partículas de carvão não totalmente queimadas na zona de combustão, atravessando a coluna de carga com o gás ascendente, poderia alterar as características da escória e as condições de permeabilidade, interferindo no controle operacional do reator ⁽⁴⁾.

3.3.3 Avaliação e Cálculo da Eficiência de Combustão

Para a avaliação da eficiência da combustão, em função das diversas variáveis, foram realizados muitos trabalhos a partir de montagens experimentais.

Algumas equações propostas permitem o cálculo da eficiência da combustão de uma maneira indireta, ou seja, através dos teores de cinza no resíduo queimado relacionado com a cinza do carvão pulverizado.

Haywood et alii ⁽⁸⁾ fazem o seguinte cálculo:

$$\eta_{cp} = \frac{1 - ((\text{Cinza})_{CP} / (\text{Cinza})_{PO})}{1 - (\text{Cinza})_{CP} / 100} \cdot 100 \quad (3.4)$$

em que:

η_{CP} é a eficiência da combustão do carvão pulverizado (%);

$(\text{Cinza})_{CP}$ é o teor de cinza no carvão pulverizado (%), e

$(\text{Cinza})_{PO}$ é o teor de cinza no pó coletado no aparato experimental, após a queima (%).

Ueno et alii ⁽⁹⁾ já definem de maneira diferente a eficiência de combustão:

$$\eta_{cp} = 100 \cdot \left\{ 1 - \frac{[100 - (\text{Cinza})_{PO}] / (\text{Cinza})_{CP}}{[100 - (\text{Cinza})_{CP}] / (\text{Cinza})_{PO}} \right\} \quad (3.5)$$

em que:

η_{CP} é a eficiência da combustão do carvão pulverizado (%);

$(\text{Cinza})_{CP}$ é o teor de cinza no carvão pulverizado (%), e

$(\text{Cinza})_{PO}$ é o teor de cinza no pó coletado no aparato experimental, após a queima (%).

Yamaoka e Kamei ⁽¹⁰⁾ incluem, também o teor de materiais combustíveis no cálculo da eficiência de combustão:

$$\eta_{cp} = \frac{(\text{Comb})_{CP} / (\text{Cinza})_{CP} - (\text{Comb})_{PO} / (\text{Cinza})_{PO}}{(\text{Comb})_{CP} / (\text{Cinza})_{CP} - 1} \cdot 100 \quad (3.6)$$

em que:

η_{CP} é a eficiência da combustão do carvão pulverizado (%);

$(\text{Comb})_{CP}$ é o teor de materiais combustíveis no carvão pulverizado (%), e

$(\text{Comb})_{PO}$ é o teor de materiais combustíveis no pó coletado, após a queima (%).

Yamagata et alii ⁽¹¹⁾ utilizam outro esquema de cálculo:

$$\eta_{cp} = 100 \times \left[\frac{(\text{Carb})_{CP}/(\text{Alum})_{CP} - (\text{Carb})_{PO}/(\text{Alum})_{PO}}{(\text{Carb})_{CP}/(\text{Alum})_{CP} - (\text{Carb})_{PO}/(\text{Alum})_{PO}} \right] \quad (3.7)$$

em que:

- η_{CP} é a eficiência da combustão do carvão pulverizado (%);
- $(\text{Carb})_{CP}$ é o teor de carbono no carvão pulverizado (%);
- $(\text{Alum})_{CP}$ é o teor de alumina no carvão pulverizado (%);
- $(\text{Carb})_{PO}$ é o teor de carbono no pó coletado, após a queima (%), e
- $(\text{Alum})_{PO}$ é o teor de alumina no pó coletado, após a queima (%).

3.3.4 Otimização da Combustão do Carvão Pulverizado no Raceway

Aspectos ligados à natureza do carvão

- Matéria volátil do carvão

A matéria volátil liberada durante a pirólise do carvão consiste principalmente de gases combustíveis como o hidrogênio, monóxido de carbono, metano e outros hidrocarbonetos. Hidrocarbonetos pesados (alcatrão) e gases incombustíveis (como o dióxido de carbono e vapor) são também parte da matéria volátil⁽¹²⁾.

Quando se utiliza carvões de menor combustibilidade, por exemplo, carvões baixo voláteis, ocorre maior geração de finos de carvão na saída do *raceway*. Conforme comentado anteriormente, uma corrente indica que os finos gerados apresentam elevada reatividade e são consumidos por *solution loss*, preferencialmente ao coque. Assim, o coque teria seu tempo de residência na região aumentado, podendo sofrer maior degradação e gerar mais finos. Por outro lado, como a geração de gases no *raceway* é menor em função do menor teor de voláteis do carvão, a turbulência nessa região será menor, diminuindo o *momentum* do sopro e, como consequência, contribuiria para uma menor degradação do coque. Com a injeção de carvão alto volátil, ocorreria menor geração de finos oriundos do carvão no *raceway*, finos esses que serão mais rapidamente consumidos por *solution loss* e não contribuirão efetivamente para aumento do tempo de residência do coque na região, o que ajudaria na preservação de sua integridade física. Contudo, a grande geração de gases nessas condições provocará

aumento do *raceway* na região, através do aumento do *momentum* do sopro, o que tende a provocar a colisão entre as partículas de coque, conduzindo a uma maior degradação e geração de finos. A figura 3.5 indica os efeitos do tipo de carvão usado na injeção sobre as condições do “ninho de pássaro”.

O *rank* do carvão afeta a composição da matéria volátil e a proporção de gases incombustíveis aumenta à medida que o *rank* diminui. A composição maceral afeta substancialmente a quantidade de matéria volátil liberada pelo carvão.

Entretanto, considerando-se a diferença entre o teor de matéria volátil e a quantidade de voláteis realmente liberada no *raceway* e que existem diferenças na composição dessa matéria volátil em função do *rank* e da composição maceral do carvão, pode-se concluir que ainda existem incertezas quanto aos diferentes conceitos ou regras sobre qual o melhor tipo de carvão para ser usado como injetante.

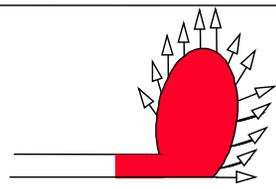
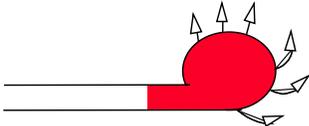
CARACTERÍSTICAS	CARVÃO ALTO VOLÁTIL	CARVÃO BAIXO VOLÁTIL
Visualização da Chama	 Aumento no Volume de Gás	 Diminuição do Volume de Gás
Formação do <i>raceway</i>		
Conseqüências no <i>raceway</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Dificil dispersão do sopro ✓ Alta pressão de sopro ✓ Instabilidade de pressão e chaminé 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Rápida dispersão do sopro ✓ Baixa pressão de sopro ✓ Estabilidade de pressão
Fatores afetados	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Degradação do coque ✓ Tamanho do coque de rampa 	
Fatores Favoráveis à Formação do Ninho de Pássaro	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Grande turbulência do <i>raceway</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Maior geração de <i>char</i> ✓ Maior tempo residência coque
Fatores Inibidores à Formação do Ninho de Pássaro	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Menor geração de <i>char</i> ✓ Menor tempo de residência coque 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Menor turbulência do <i>raceway</i>

FIGURA 3.5 – Efeitos do tipo de carvão injetado sobre as condições do ninho de pássaro ^(12, 13).

- Taxa de substituição e teor de carbono

A eficiência de combustão é normalmente expressa em termos da taxa de substituição de combustível. Essa taxa é definida como a relação do coque economizado e o carvão injetado para uma temperatura constante de sopro. Diversos autores desenvolveram fórmulas para cálculo da taxa de substituição ^(14, 15).

Hutny et alli ⁽¹⁶⁾ reportaram um aumento geral na taxa de substituição com a relação C/H do carvão. Além disso obtiveram uma relação entre a taxa de substituição e o *rank* do carvão (figura 3.6) que mostra que a taxa de substituição aumenta com o aumento do *rank* (indicado pelo aumento do teor de carbono). Essa relação foi comprovada por Brouwer e Toxopeus ⁽¹⁷⁾, que ao avaliarem os resultados operacionais de injeção no alto-forno de Ijmuiden chegaram à seguinte relação entre a taxa de substituição e as propriedades do carvão: $RR (\%) = (- 118,9 + 2,3 C + 4,5 H + 0,97 \text{ Cinza}) / 100$, embora o efeito da cinza sobre a taxa de substituição não seja o esperado ⁽¹⁸⁾.

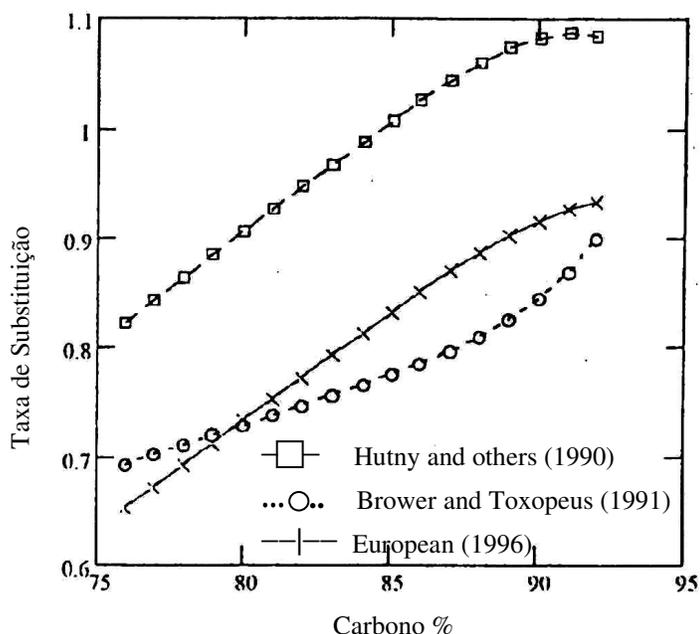


FIGURA 3.6 – Variação da taxa de substituição em função do *rank* do carvão injetado ⁽¹⁷⁾.

- Umidade

Mais carvão pode ser injetado com umidade total mais baixa, para uma dada temperatura de chama. Como as partículas de carvão pulverizado são muito pequenas, a maior parte da umidade comporta-se como umidade livre. Por isso, para que o carvão pulverizado seja transportado de maneira adequada, a sua umidade total é mantida em torno de 1% para assegurar que ele flua mais facilmente.

- Influência dos teores de carbono e de oxigênio do carvão

O carvão mineral é constituído em sua maioria pelos elementos carbono e oxigênio, sendo o primeiro responsável direto pela substituição energética do coque através de sua combustão no *raceway*, enquanto o segundo promove uma influência indireta, pois um teor mais elevado de oxigênio acarreta, conseqüentemente, uma diminuição no teor de carbono. Logo, quanto maior o teor de C no carvão, menor o de O e mais elevada é a taxa de substituição. Na figura 3.7 observa-se um gráfico que confirma essa tendência⁽¹³⁾.

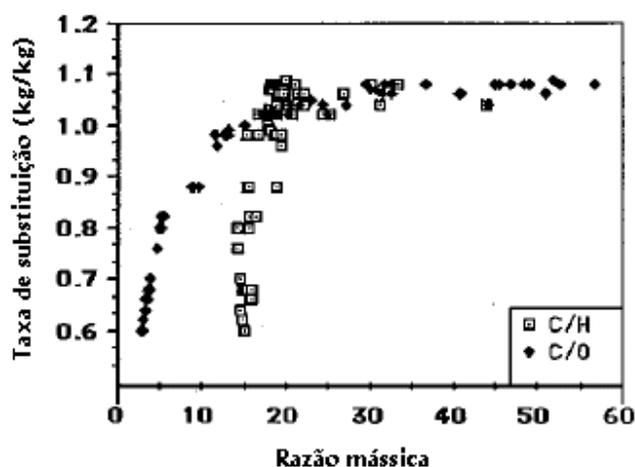


FIGURA 3.7 – Efeito de C e O na taxa de substituição⁽¹⁶⁾.

Como pode ser visto na figura 3.7, aumentando-se a razão mássica de C/H, que implica no aumento do teor de carbono, a taxa de substituição também aumenta. Comportamento similar ocorre com a relação C/O, em que o teor de C aumenta e de O diminui, elevando a taxa de substituição. Resultados com dados industriais da Cosipa⁽¹⁹⁾, apresentaram a mesma tendência para cada elemento separadamente.

- Influência do poder calorífico do carvão

O poder calorífico está intimamente ligado à quantidade de carbono que o carvão possui, pois indica a energia fornecida ao se queimar determinada massa do combustível, e este liberará mais energia a medida que o teor de C se eleva na sua constituição. Logo, a taxa de substituição aumenta proporcionalmente com o poder calorífico.

Alguns autores analisaram e correlacionaram a taxa de substituição com o poder calorífico através de dados laboratoriais e operacionais^(16, 19), encontrando bons resultados.

- Influência do teor de cinza do carvão

A cinza é um material inerte (não sofre combustão) presente na composição do carvão. Portanto, um teor mais elevado desse constituinte reduz percentualmente a quantidade de carbono, diminuindo o poder calorífico e, conseqüentemente, a taxa de substituição. Uma variação de 1% no teor da cinza diminui, teoricamente, a taxa de substituição do combustível em cerca de 0,008 a 0,012% dependendo do *rank* do carvão⁽¹⁶⁾. O desejável é o mínimo possível de cinza na matéria-prima, visto a dificuldade da sua retirada do mineral extraído diretamente das minas.

Aspectos ligados às condições operacionais do alto-forno

- Tamanho de partícula

As influências do teor de voláteis e da granulometria sobre a combustão do carvão foram também avaliadas por Kortas et alii⁽²⁰⁾, cujas experiências mostraram que os carvões podem ser classificados em três faixas granulométricas, no que se refere ao seu comportamento durante a combustão: menor que 0,1mm; entre 0,1 e 1mm e maior que 1mm. Para o primeiro grupo, o teor de voláteis é o fator determinante para a combustão. Para tamanhos de grão maiores que 0,1mm, além do teor de voláteis, a taxa de transferência de calor na partícula passa a influenciar a combustão, ou seja, a porosidade e o teor de cinza passam a ser importantes⁽²¹⁾.

Estudos posteriores realizados por Weber et alii⁽²²⁾ comprovaram a importância do tamanho de grão no processo. Observou-se nestes experimentos que partículas menores se aquecem homoganeamente e, à medida que se aumenta o diâmetro, promove-se maiores gradientes térmicos entre o centro e a superfície da partícula. Assim, partículas menores que 0,1mm, como o carvão pulverizado, não apresentam problemas de transferência de calor e o teor de voláteis é fator primordial para a combustão do material.

Estudos realizados por Takeda et alii⁽²³⁾ indicaram que, além do teor de voláteis e granulometria, a fluidez do carvão também desempenha um papel importante na combustão. Baseado em amostras coletadas no *raceway* do alto-forno através de sondas especiais, concluiu-se que carvões alto voláteis com nenhuma fluidez são os ideais em termos de queima nas ventaneiras. Este estudo demonstrou também que carvões médio voláteis sem fluidez podem queimar melhor nas ventaneiras que determinados carvões alto voláteis de alguma fluidez.

- Taxa de carvão/excesso de ar

Para que a queima do carvão nas ventaneiras ocorra de modo satisfatório, as condições estequiométricas e cinéticas, associadas às reações de combustão, devem ser atendidas nesta região. Do ponto de vista estequiométrico, a oxidação completa do carbono do carvão é limitada pela relação molar oxigênio/carbono crítica ($O/C=2$), abaixo da qual não haverá condições para ocorrência de reação completa de combustão. Quando se mantém constantes as condições de sopro (vazões de ar e oxigênio), maiores taxas de injeção geram maior degradação das condições estequiométricas.

- Temperatura do ar soprado

Suzuki et alii⁽²⁴⁾ avaliaram o efeito da temperatura do ar soprado na eficiência de combustão do carvão pulverizado (figura 3.8 - a) na faixa de 1000 a 1200°C. Observa-se que o aumento da temperatura de ar soprado melhora a combustão do carvão pulverizado. O aumento da eficiência de combustão é mais pronunciado na faixa de 1000 a 1100°C, e a partir de 1100°C a eficiência de combustão tem uma variação pequena com a temperatura. Mas Ueno et alii⁽⁹⁾ discordam dessa última avaliação e

mostram que um aumento de temperatura sempre leva a um ganho razoável na eficiência de combustão de carvão, mesmo em temperaturas superiores a 1200°C (figura 3.8 - b).

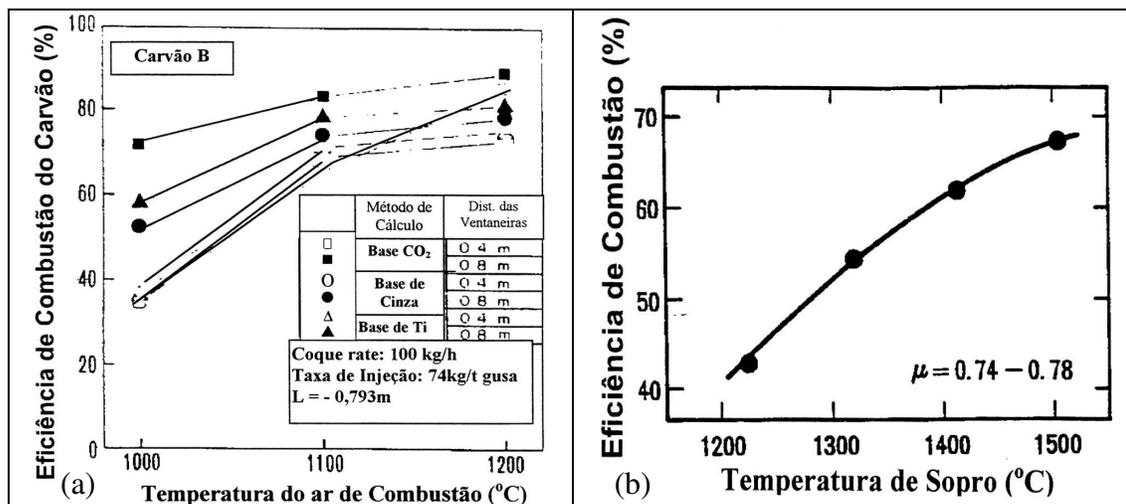


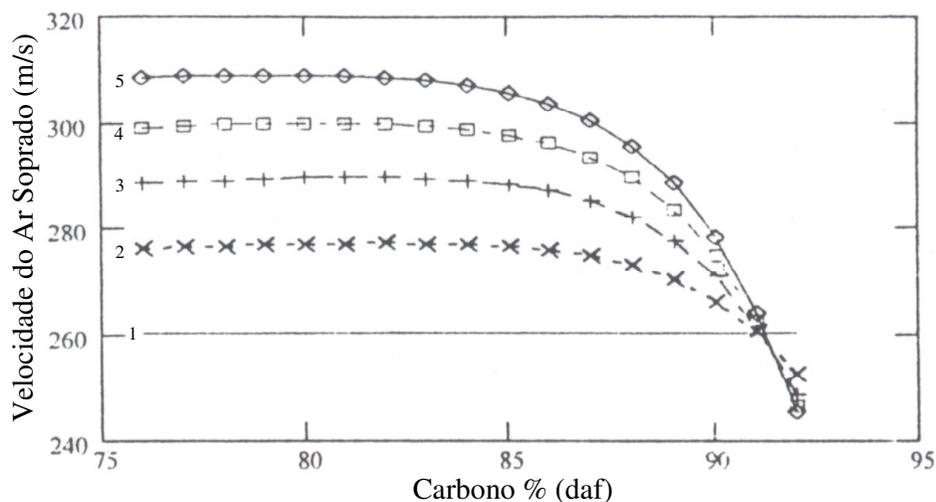
FIGURA 3.8 – Efeito da temperatura do ar soprado na eficiência de combustão de carvão pulverizado, segundo Suzuki et alii (a) e Ueno et alii (b), citados por Castro et alii ⁽⁵⁾.

O μ (figura 3.8 - b) é definido como sendo a relação entre a quantidade de oxigênio do ar soprado e do carvão pulverizado e a quantidade de oxigênio necessária para a combustão completa do carbono e do hidrogênio do carvão pulverizado para CO₂ e H₂O, respectivamente. Um valor de μ em torno de 0,84 é suficiente para se ter η_{CP} igual a 100%.

- Velocidade do ar soprado

A velocidade do sopro e, portanto, a profundidade do *raceway*, depende do diâmetro da ventaneira, volume de sopro, temperatura de sopro, pressão de sopro e da quantidade de carvão queimado dentro da ventaneira. A fração de carvão queimada dentro da ventaneira é igual ao teor de volátil do carvão, descontada alguma parcela referente à formação de alguma fuligem, já que o tempo de residência dentro do *raceway* é insuficiente para que qualquer combustão significativa do *char* ou da fuligem ocorra. O calor liberado da combustão dos voláteis pode ser calculado de maneira aproximada usando as correlações desenvolvidas por Unsworth et alii ⁽²⁵⁾. Usando as relações entre

os rendimentos de *char*, voláteis e fuligem, e o *rank* do carvão é possível estimar como a velocidade de sopro varia com o *rank* do carvão (figura 3.9) para diferentes taxas de injeção de carvão. As curvas foram determinadas para taxa de ar de sopro, enriquecimento de oxigênio e temperatura de sopro constantes ⁽¹⁸⁾.



1 - taxa de PCI = 0 kg/t gusa; 2 - taxa de PCI = 50 kg/t gusa; 3 - taxa de PCI = 100 kg/t gusa;
4 - taxa de PCI = 150 kg/t gusa; 5 - taxa de PCI = 200 kg/t gusa

FIGURA 3.9 – Variação da velocidade do ar soprado com o *rank* do carvão ⁽¹⁸⁾.

- Enriquecimento de oxigênio

A eficiência de combustão do carvão pulverizado aumenta com um maior enriquecimento de oxigênio no ar soprado. Isso porque a temperatura de chama e a pressão parcial de oxigênio em volta das partículas de carvão aumentam quando se usa mais oxigênio no sopro e, conseqüentemente, a desvolatilização e a combustão do carvão ficam mais eficientes. A figura 3.10 (a) confirma essa afirmativa.

O raciocínio anterior é válido quando o enriquecimento de oxigênio aumenta o índice μ . Quando essa relação fica constante, a partir de um certo valor de enriquecimento de oxigênio, a concentração de carvão aumenta, diminuindo o contato carvão/oxigênio. Isso causa uma menor eficiência de combustão de carvão pulverizado. Yamaguchi et alii ⁽²⁶⁾ estabeleceram experimentalmente esse valor como sendo 4% de enriquecimento de oxigênio. A figura 3.10 (b) mostra o resultado do trabalho. A figura 3.11 confirma o fato de que o aumento da eficiência de combustão do carvão pulverizado não depende

somente do teor a mais de oxigênio no ar, mas também da relação oxigênio/carbono no sopro e no carvão injetado ⁽⁵⁾.

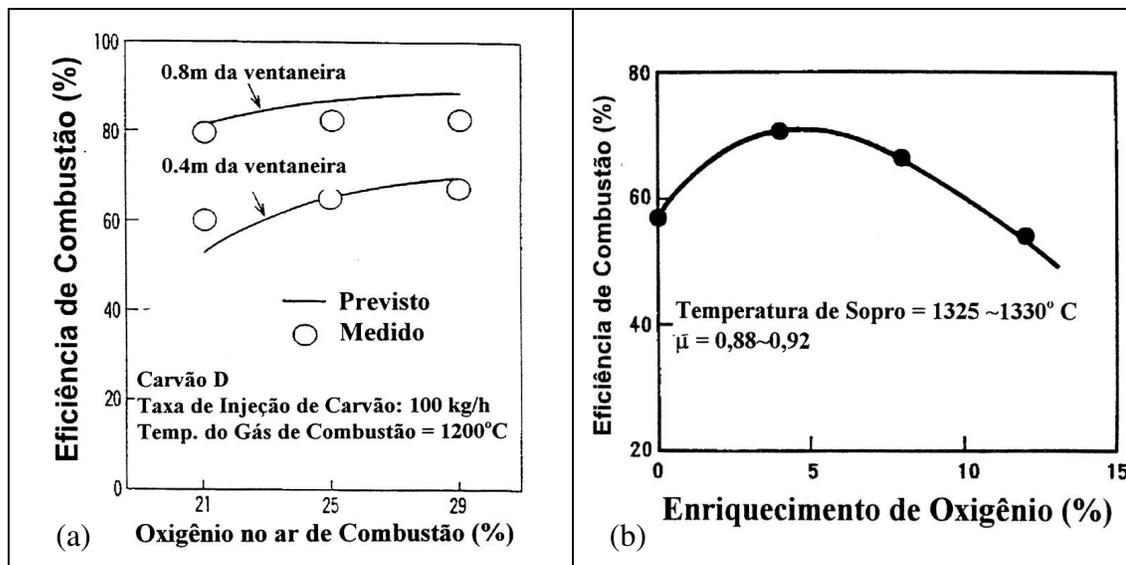


FIGURA 3.10 – Efeito do enriquecimento de oxigênio na eficiência de combustão de carvão pulverizado: (a) segundo Suzuki et alii e (b) para um valor de μ (oxigênio do ar + carvão/oxigênio para queima total) constante, segundo Yamaguchi et alii, citados por Castro et alii ⁽⁵⁾.

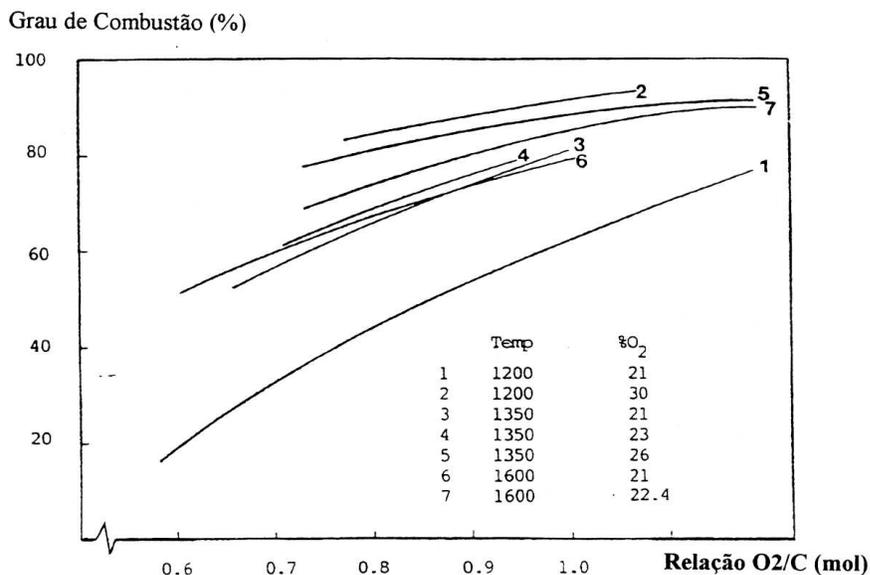


FIGURA 3.11 – Eficiência de combustão do carvão pulverizado em função da relação O₂/C no sopro, segundo Strömquist et alii, citado por Castro et alii ⁽⁵⁾.

- Influência da taxa de injeção

A injeção de carvão acarreta diversas consequências positivas e negativas ao alto-forno, sendo necessária a modificação em um ou vários parâmetros operacionais para retomar a estabilidade do processo ⁽²⁷⁾. Mudanças mais drásticas acontecem quando da prática de taxas de injeção acima de 100kg/t de gusa. Entretanto, não é o foco deste trabalho relacionar tais consequências, mas sim associar a taxa de substituição com a taxa de injeção.

Cada carvão possui um poder calorífico específico. Quanto mais elevado o valor dessa propriedade, melhor é o combustível e menor a quantidade que deve ser injetada para uma determinada carga do alto-forno. Para valores menores, a taxa de injeção deve ser aumentada para compensar a queda do poder calorífico, considerando a mesma carga. A conclusão final dessa observação é a diminuição da taxa de substituição quando a taxa de injeção se eleva ⁽¹⁴⁾.

Uma prática normalmente adotada é a blendagem de carvões que possuem diferentes valores de poder calorífico, com a finalidade de equilibrar o resultado final, proporcionando melhorias consideráveis para a taxa de substituição. Maranhã ⁽¹⁹⁾, comenta os resultados alcançados a partir da análise de dados industriais da Cosipa após instalação do sistema de blendagem. Vale lembrar que não foi relatada qualquer medida operacional para estabilidade do processo ao se modificar a taxa de injeção.

3.4 EFEITOS DA INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO NO ALTO-FORNO

3.4.1 Aspectos Gerais

Segundo trabalho de Castro et alii ⁽⁵⁾, o primeiro efeito, do aumento da taxa de injeção (kg/t gusa), é uma maior relação de carga metálica sobre coque no carregamento. Isto é, parte do coque será suprida pelo carvão de injeção. Com isso, a distribuição de carga é toda alterada e, se nenhuma modificação de carregamento for realizada, o ângulo da carga dentro do alto-forno diminui, e o coque se concentra nas paredes, resultando num aumento do fluxo periférico dos gases. O efeito final disso é um aumento no consumo

específico de carbono (kg/t gusa) e uma diminuição na produtividade ($t/m^3.d$). Uma alteração na distribuição de carga pode minimizar essa situação negativa do aumento da taxa de injeção.

Com mais carga metálica sobre coque na carga do alto-forno, o minério, sinter e/ou pelota têm um tempo de residência maior no reator, pois ocupam um volume maior, em função da retirada do coque. Isso pode contribuir para uma melhor eficiência de redução dessa carga metálica na zona de preparação do alto-forno. Se a carga já tiver uma eficiência muito boa de redução, com um tempo de residência menor, esse efeito não é observado. Portanto, o consumo específico de carbono pode diminuir ou não.

O coque é um material mais permeável à passagem de gases do que a carga metálica. Portanto uma diminuição de coque na carga diminui a permeabilidade da zona granular do alto-forno. Se nada for feito, com relação à distribuição de carga, a espessura da zona de amolecimento e fusão aumenta, diminuindo também a permeabilidade dessa zona. Logo a queda de pressão total do forno aumenta. A eficiência de redução da carga metálica pode diminuir por esse motivo. O efeito final é um maior consumo específico de carbono e uma menor produtividade do alto-forno.

Com o aumento da taxa de injeção (kg/t gusa), uma maior quantidade de carvão pulverizado, em kg/t gusa, será queimada na zona de combustão. A substituição do coque pelo carvão pulverizado tem uma característica importante, pois o carvão pulverizado tem um teor de voláteis muito maior do que o coque (< 1,0%). Portanto, se considerarmos que 1kg de carbono do carvão substitui 1kg de carbono do coque, tem-se uma entrada maior de gases no processo em função dos voláteis do carvão. Para ilustrar esse raciocínio, considera-se um coque com 88% de carbono fixo e 0% de voláteis e um carvão pulverizado com a seguinte análise elementar: 82% de carbono e 5,8% de hidrogênio ⁽⁵⁾.

Nesse caso, para a relação de substituição de 1kg de carbono, tem-se a taxa de substituição de 0,92kg coque/kg carvão. Considerando que os gases que saem da zona de combustão são formados por CO, H₂ e N₂, 0,92kg de coque gera 1,52Nm³ de CO. Já 1kg de carvão gera esse volume de CO e mais 0,65Nm³ de H₂, o que corresponde a um aumento de 43% no volume dos gases.

Mesmo considerando uma taxa de substituição de 1,1kg de coque/kg de carvão, para as condições anteriores, o aumento no volume dos gases seria de 21%.

Portanto, uma utilização maior de carvão pulverizado aumenta o volume de gases (Nm^3/t gusa) nas ventaneiras, na rampa e na cuba do alto-forno. Isso tem como consequência o aumento de queda de pressão em todo reator, diminuindo a produtividade.

A razão térmica sólido/gás diminui com o aumento da taxa de injeção no alto-forno a coque. Isso por dois motivos: com menos coque na carga tem-se uma vazão mássica de sólido menor, mesmo para a mesma vazão mássica de gás; e como foi dito anteriormente, a vazão mássica de gás aumenta, devido aos voláteis do carvão injetado. Os efeitos imediatos disso são o aumento da temperatura dos gases de topo e o aumento do nível térmico do alto-forno. A zona de amolecimento e fusão se eleva, aumentando a zona de gotejamento. Como a incorporação de silício acontece durante o gotejamento, provavelmente o teor de silício do gusa será maior com maiores taxas de injeção de carvão pulverizado. Além disso, as perdas térmicas da zona de elaboração serão maiores, contribuindo para um maior consumo específico de carbono. O tempo de residência do coque no gotejamento aumenta, o que faz com que a reação de “*solution loss*” ocorra em maior proporção e o ataque de álcalis também é maior. Tudo isso tem como consequência uma maior degradação do coque e daí uma menor produtividade.

Com relação ao efeito de aumento do nível térmico do alto-forno foi observado nos altos-fornos da Usiminas que, após o advento da injeção de finos de carvão, não foram constatadas tendências de deslocamento do fluxo gasoso no sentido periférico dos fornos. No que diz respeito à tendência de elevação dos teores de silício do gusa, a mesma foi ligeiramente observada nos altos-fornos da Usiminas, sendo verificado o efeito contrário na Acesita.

O carvão pulverizado possui uma grande quantidade de materiais voláteis, que por sua vez tem muito H_2 . Esse gás redutor participa, então, das reações de redução da carga metálica. O efeito dessa maior participação de H_2 na redução pode ocasionar um menor consumo específico de carbono.

Outro efeito de uma maior taxa de injeção de carvão é um aumento de carvão não queimado, ou uma menor eficiência de combustão do carvão. Nesse caso o carvão reage

com o CO₂, preferencialmente ao coque, dentro do alto-forno. O coque fica mais tempo na zona de combustão, o que contribui para a sua degradação sob colisão e a concentração de finos de coque na frente da zona de combustão, formando o que se chama de “ninho de pássaro” (“*bird’s nest*”). A consequência desse fato é um homem morto mais impermeável, prejudicando a produtividade do alto-forno.

Pelo visto, o consumo específico de carbono pode aumentar ou mesmo ser menor com o aumento da taxa de injeção de carvão pulverizado no alto-forno. Os vários fatores que afetam esse índice atuam com intensidades diferentes em cada situação de operação.

Porém, todos os efeitos do aumento da taxa de injeção convergem para uma menor produtividade do alto-forno. A tendência é de se ter um processo menos permeável em toda a sua extensão. Mas, conhecendo os fatores que influenciam nessa queda de produtividade, pode-se atuar no sentido de minimizar ou até mesmo reverter essa tendência.

3.4.2 Consumo de Coque: Taxa de Substituição

Segundo trabalho de Castro et alii ⁽⁵⁾, o consumo específico de carbono (kg/t gusa) num alto-forno a coque pode aumentar, diminuir ou mesmo não se alterar com a taxa de injeção de carvão pulverizado. Um índice muito utilizado na operação do alto-forno é a taxa de substituição (TS) definida como:

TS = quantidade de coque economizada (kg/t gusa) para cada kg de carvão injetado por tonelada de gusa.

Esse índice não representa diretamente a economia ou o gasto a mais de carbono, pois o teor de carbono do coque não é igual ao teor de carbono do carvão. Além do mais, esses teores variam com os tipos de coque ou carvão utilizados.

Vários fatores operacionais afetam a taxa de substituição como: qualidade do carvão injetado, temperatura de sopro, enriquecimento de oxigênio, tipo de distribuição de carga, volume de escória, qualidade da carga metálica e etc.. As figuras 3.12 e 3.13 mostram, respectivamente, a influência do tipo de carvão e do teor de cinzas do carvão na taxa de substituição. O poder calorífico, representado nas figuras, estabelece com fidelidade a qualidade do carvão. Maki et alii ⁽²⁹⁾, (figura 3.14), mostram que alterações

nas condições operacionais modificam a relação de taxa de substituição com a taxa de injeção (kg/t gusa).

Portanto, para se estabelecer comparações de taxa de substituição é necessário que se corrija os valores para as mesmas condições operacionais, o que é chamado de “taxa de substituição corrigida”. Isto é, estabelecem-se variações no *coke-rate* em função de alterações operacionais. A figura 3.15 mostra a taxa de substituição em função da taxa de injeção para o alto-forno da Thyssen ⁽³⁰⁾, com os valores não-corrigidos e corrigidos. O valor não-corrigido da taxa de substituição é de 1,03 e de 0,86 para o valor corrigido, que é o mais exato. Nessa figura, nota-se que, para uma mesma condição operacional, a taxa de substituição não varia com a taxa de injeção.

Brouwer et alii ⁽²⁸⁾, da Hoogovens, estabeleceram uma relação, para o caso deles, para a taxa de substituição (considerando um coque com 87,5% de carbono):

$$TS = (2 \times \%C + 2,5 \times \%H_2 + 0,9 \times \%Cinza - \%H_2O \text{ carvão} - 86)/100$$

onde:

$\%C$ = teor de carbono do carvão pulverizado;

$\%H_2$ = teor de hidrogênio do carvão pulverizado;

$\%Cinza$ = teor de cinza do carvão pulverizado;

$\%H_2O$ = teor de umidade do carvão pulverizado.

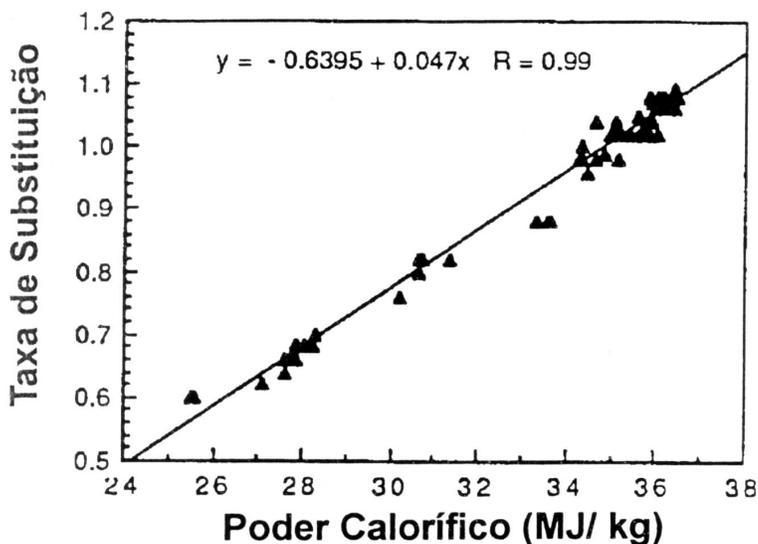


FIGURA 3.12 – Taxa de substituição em função do poder calorífico do carvão, segundo Hutny et alii ⁽¹⁶⁾.

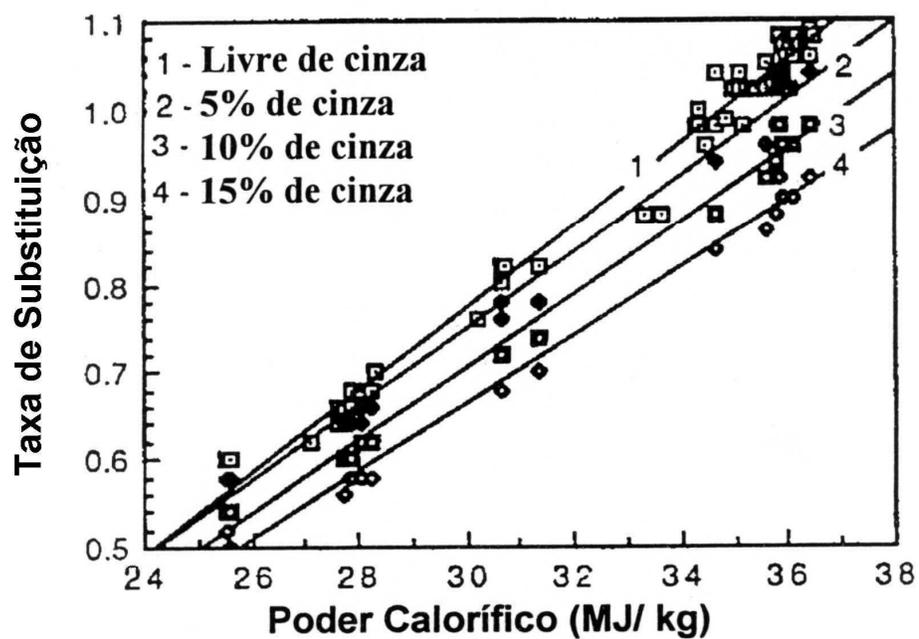


FIGURA 3.13 – Taxa de substituição em função do poder calorífico do carvão com vários teores de cinza, segundo Hutny et alii ⁽¹⁶⁾.

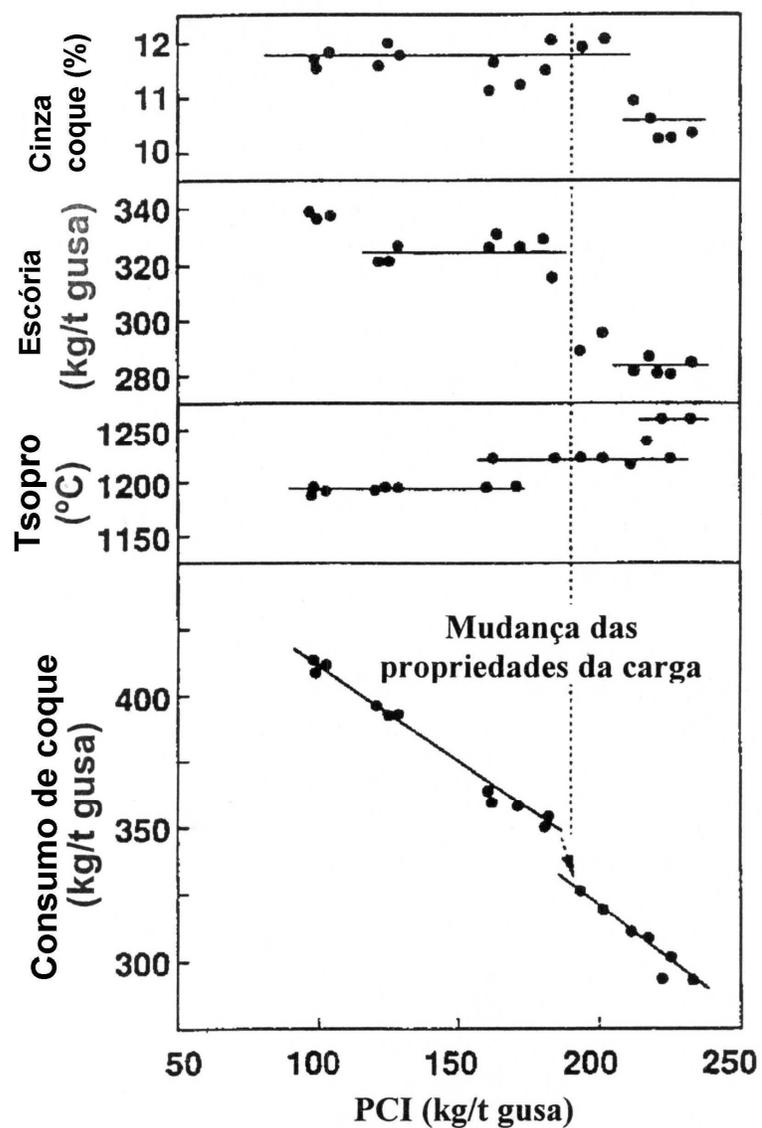


FIGURA 3.14 – Relação entre taxa de substituição e taxa de injeção de carvão pulverizado e a influência da temperatura de sopro, volume de escória e cinza do coque, segundo Maki et alii ⁽²⁹⁾.

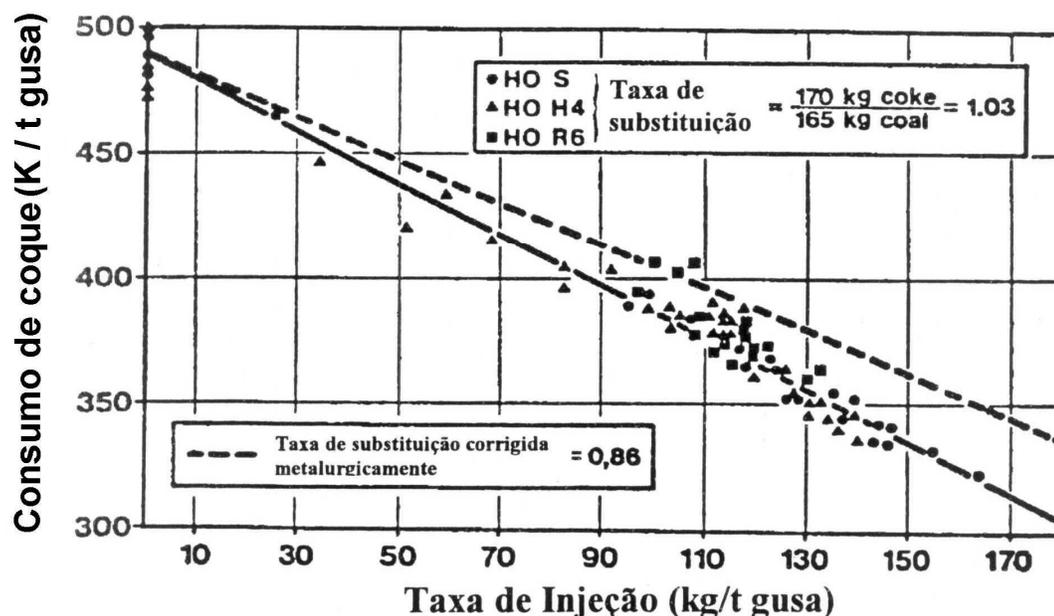


FIGURA 3.15 – Relação entre consumo de coque e taxa de injeção, mostrando a taxa de substituição corrigida metalurgicamente, segundo Peters et alii ⁽³⁰⁾.

Enfatizando, a taxa de substituição não depende da taxa de injeção para uma mesma condição operacional. Porém, sempre acontecem alterações quando se aumenta a taxa de injeção. Yamaguchi et alii ⁽³¹⁾ mostram bem isso na figura 3.16. Observa-se que a taxa de substituição é mantida em torno de 1,0 até a taxa de injeção de 190kg/t gusa. Isso porque, através de melhoria na redutibilidade do sinter e uma melhor distribuição de carga permitiram uma melhor eficiência de redução na zona de preparação. Mas para taxas de injeção em torno de 200kg/t gusa, a eficiência de combustão diminuiu, como já comentado, e não se consegue manter uma boa eficiência da zona de preparação. Com isso, a taxa de substituição diminuiu para valores em torno de 0,85.

Yoshida et alii ⁽³²⁾ (Kobe Steel) reforçam o que foi comentado anteriormente e na figura 3.17 mostram que a taxa de substituição diminuiu com o aumento da taxa de injeção. Isso é atribuído pela diminuição da eficiência de redução da carga metálica na zona de preparação quando se aumenta a taxa de injeção.

Maki et alii ⁽²⁹⁾ mostraram (figura 3.18) que é possível uma redução no *coke-rate* (Alto-Forno 4 de Fukuyama) com o aumento da taxa de injeção (PCI), mantendo constante a

taxa de substituição, através de melhorias realizadas para otimizar a zona de preparação. Essas melhorias foram: a redutibilidade do sinter e a distribuição de carga.

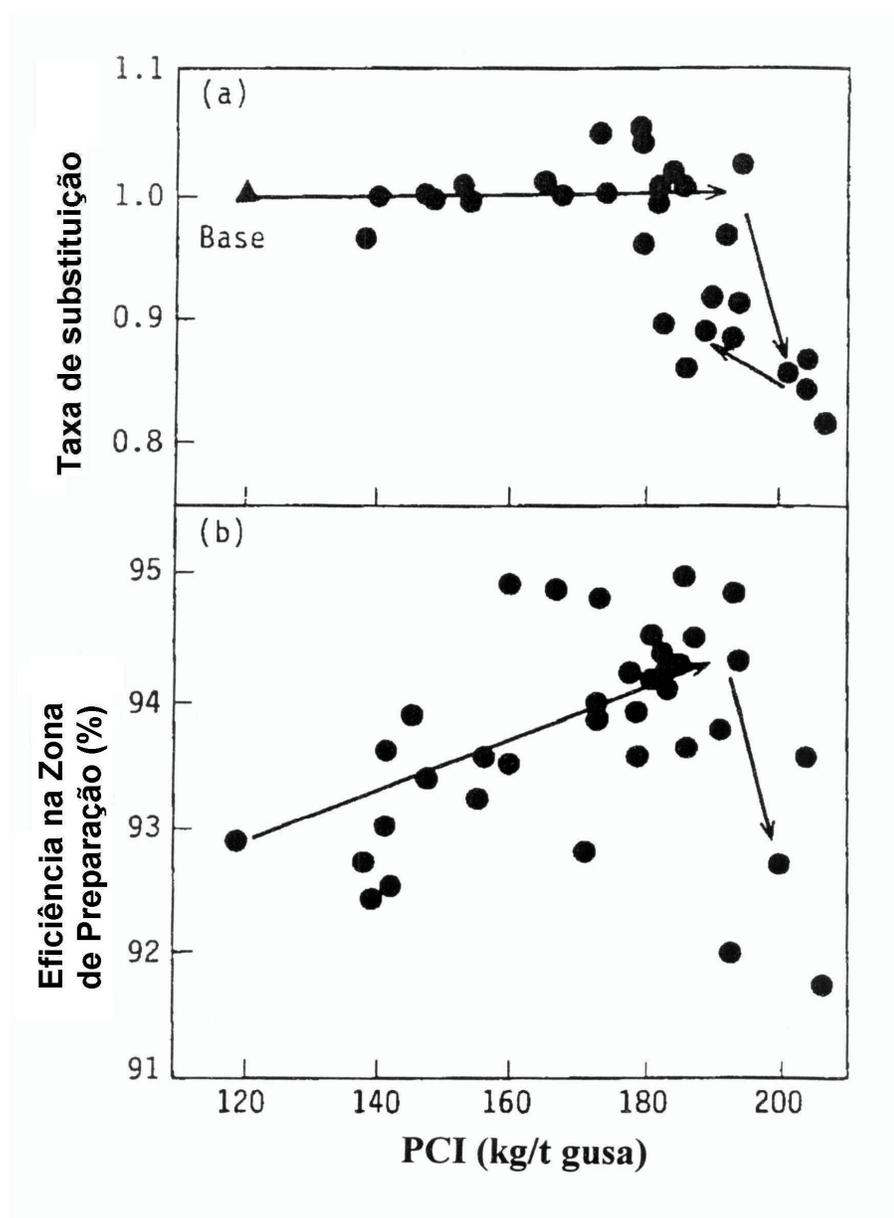


FIGURA 3.16 – Relação entre taxa de injeção, taxa de substituição e eficiência de redução na zona de preparação, segundo Yamaguchi et alii⁽³¹⁾.

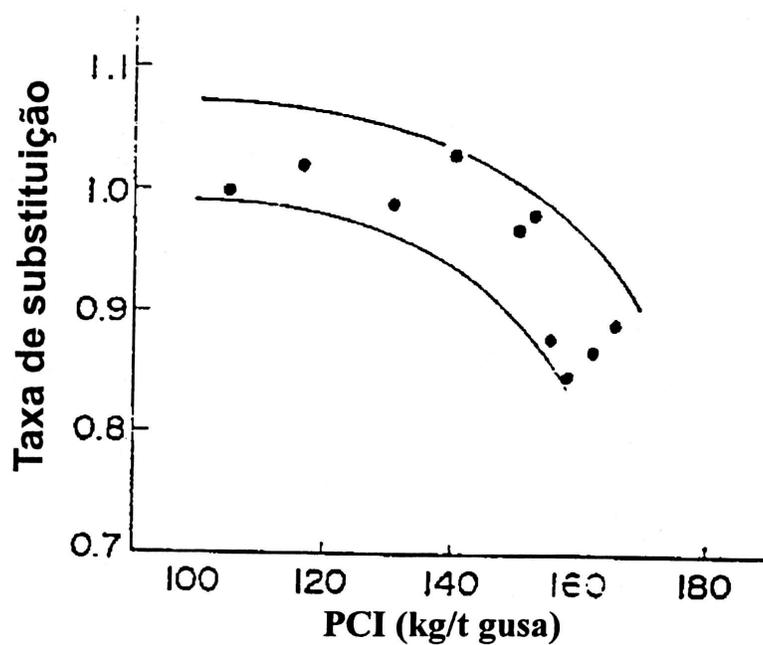


FIGURA 3.17 – Relação entre taxa de substituição e taxa de injeção, segundo Yoshida et alii ⁽³²⁾.

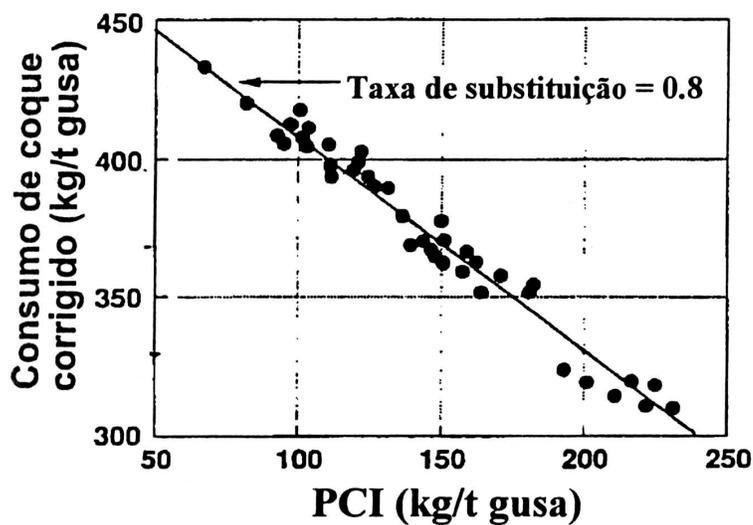


FIGURA 3.18 – Relação entre taxa de injeção e o consumo de coque corrigido, segundo Maki et alii ⁽²⁹⁾.

3.4.3 Cálculo da Taxa de Substituição na Usiminas

Inicialmente, na Usiminas, usava-se apenas um tipo de carvão por vez, passando-se posteriormente à blendagem de dois tipos complementares desse combustível.

A avaliação da eficácia da injeção de carvão pulverizado é notada através da taxa de substituição, definida como quantidade de coque economizada (kg/t de gusa) para cada kg de carvão injetado por tonelada de gusa. No entanto, ela não representa diretamente a relação energética ligada à economia ou ao gasto a mais de carbono, pois o teor deste elemento no coque não é igual ao do carvão. Além do mais, esses teores variam com o tipo de coque e carvão utilizados.

A fórmula utilizada para se obter o valor da taxa de substituição na Usiminas é dada pela equação 3.8:

$$TS = \frac{CR_{All_Coke} - CR_{Corrigido}}{Taxa_Injeção} \quad (3.8)$$

em que,

TS é a taxa de substituição;

CR_{All_Coke} é a quantidade de coque necessária para produzir uma tonelada de gusa, com o alto-forno operando somente com coque;

$CR_{Corrigido}$ é a quantidade de coque gasta para a produção real, corrigida pela fórmula de Flint;

Taxa_Injeção é a quantidade de carvão pulverizado injetada por tonelada de gusa produzido.

A fórmula de Flint é uma expressão algébrica desenvolvida por R. V. Flint, a partir da correlação estatística e da análise de dados operacionais de um número muito grande de altos-fornos. A fórmula de Flint permite correlacionar o consumo específico de carbono e, conseqüentemente, o *coke-rate* com um grande número de variáveis do processo de fabricação do gusa no alto-forno. Permite ainda, sua aplicação na solução de problemas típicos da área de alto-forno tais como, cálculo de carga e previsão do *coke-rate*, variação do *coke-rate* com a variação de parâmetros operacionais do forno e, finalmente, cálculo do *coke-rate* para diferentes alternativas de marcha e de carga do

alto-forno. A fórmula foi desenvolvida em termos de consumo de carbono, o que é possível de correspondência com o *coke-rate*, através do conhecimento do carbono fixo do coque. Dentre as 28 variáveis correlacionadas por Flint, apenas 11 variáveis são utilizadas no cálculo do *coke-rate* corrigido na Usiminas.

O valor de CR_{All_Coke} foi originalmente estimado a partir de dados históricos com operação sem injeção (antes de 1993). Porém, como as condições geométricas e operacionais dos altos-fornos se modificaram, optou-se por fazer nova estimativa para esse parâmetro quando houve a parada da fábrica de oxigênio, em agosto de 2002.

Desta forma, no desenvolvimento do trabalho foram determinadas as variáveis que mais influenciam a taxa de substituição, e, posteriormente, foi realizada uma análise estatística dos dados operacionais do Alto-Forno 3 da Usiminas (AF3), no período de setembro de 2002 a dezembro de 2006.

3.5 METODOLOGIA DE TROCA DE CARVÕES INDIVIDUAIS E/OU MISTURAS INJETADOS NO ALTO-FORNO

A injeção de finos de carvão pelas ventaneiras dos altos-fornos é o principal meio de redução do custo de produção do gusa e da diminuição da dependência de coque no processo. Atualmente, a manutenção de elevadas taxas de injeção de finos de carvão e de produtividade no alto-forno constitui-se num grande desafio tecnológico. Assim sendo, antever o efeito da alteração do tipo de carvão (ou mistura) injetado nas ventaneiras do alto-forno, na variação do consumo de combustíveis (*fuel-rate*), contribui na estabilidade do processo, na manutenção da produtividade e na redução de custos de produção de gusa.

A avaliação de inúmeros artigos técnicos mostra que, tanto os efeitos da injeção de carvão pulverizado nas ventaneiras dos altos-fornos como as condições de combustão do carvão foram estudados por diversos autores ⁽⁴⁻³²⁾. São análises que utilizam de resultados industriais, bem como de experimentos em escala de laboratório. A otimização da técnica de injeção de finos de carvão pressupõe ajustes operacionais nos altos-fornos (condições de sopro, distribuição de carga, qualidade das matérias-primas), além da escolha de carvões que favoreçam a obtenção de elevadas taxas de substituição coque/carvão.

Tem-se uma grande variedade de carvões disponíveis para injeção nas ventaneiras dos altos-fornos. As trocas dos carvões injetados, em maior ou menor escala em cada empresa, sempre ocasionam variações na operação do alto-forno.

No caso da Usiminas, as trocas de carvões (ou misturas binárias de carvões) injetados nos altos-fornos são regidas por aspectos técnicos (qualidade dos carvões) associados a fatores econômicos e de abastecimento (área de suprimentos).

4 METODOLOGIA

A injeção de finos na Usiminas foi iniciada em 1993. Nesse período, foram utilizados dezenas de carvões, além de misturas binárias dos carvões. Tem-se, via banco de dados, todo o histórico referente às características dos carvões consumidos, bem como os resultados obtidos nos altos-fornos. Todo carvão adquirido para injeção nos altos-fornos é caracterizado no recebimento, além disso, foram efetuadas simulações de combustão. As experiências de combustão foram realizadas no simulador de combustibilidade de carvão pulverizado da Usiminas (Centro de Pesquisas).

O desenvolvimento desse trabalho, via metodologia estatística, foi baseado nos resultados industriais obtidos nos altos-fornos da Usiminas.

Considerando a extensão do banco de dados (iniciado em 1993), foi necessária uma seleção do período a ser utilizado no desenvolvimento do trabalho. Também foi avaliada a opção de adotar os resultados de todos os três altos-fornos existentes ou somente de um forno específico.

Baseando-se na revisão bibliográfica foram determinadas as variáveis que mais influenciam a taxa de substituição nos altos-fornos da Usiminas sendo, posteriormente, realizadas análises estatísticas dos dados selecionados.

A partir da metodologia estatística adotada e das avaliações foi definido um novo modelo (equação) para o cálculo da taxa de substituição.

Numa segunda etapa, buscou-se uma estimativa da variação do *fuel-rate* quando da alteração do tipo de carvão ou mistura injetada. Para tanto, os valores de taxa de substituição, obtidos pelo modelo desenvolvido, foram correlacionados com os poderes caloríficos das várias misturas de carvão empregadas no processo.

4.1 SELEÇÃO DOS DADOS INDUSTRIAIS

No que diz respeito a injeção de finos de carvão nos altos-fornos da Usiminas, tem-se um grande volume de dados disponíveis, abrangendo não só um período muito extenso, bem como, altos-fornos com características operacionais particulares. Sendo assim,

optou-se por restringir o período a ser utilizado nas avaliações. Primeiramente, foram desconsiderados os dados referentes aos Altos-Fornos 1 e 2, já que esses fornos não possuem sistemas adequados de distribuição de carga e apresentam maiores oscilações nos resultados operacionais. Posteriormente, também foram descartados os períodos de reformas e grandes intervenções nos equipamentos. Adotou-se então, os dados referentes ao Alto-Forno 3 no período que vai de setembro de 2002 a dezembro de 2006.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DADOS OPERACIONAIS DO ALTO-FORNO 3

A montagem do banco de dados, abrangendo o período de setembro de 2002 a dezembro de 2006, totalizando 70 conjuntos de dados, foi baseada nas propriedades físicas e químicas dos carvões, bem como nos parâmetros operacionais do AF3.

A Tabela V.1 mostra os valores mínimos, máximos, e a média das principais variáveis que foram analisadas.

TABELA V.1 – Detalhamento dos principais dados utilizados.

Características dos dados de processo e de análises químicas e físicas				
Variável	Unidade	Valor mínimo	Valor máximo	Valor médio
Taxa de Injeção	(kg/t)	126,50	155,50	141,95
Poder Calorífico	(kcal/kg)	6999	7612	7275
HGI	(%)	58,02	92,92	75,38
Umidade	(%)	0,58	1,16	0,80
< 200 mesh	(%)	76,90	85,63	81,28
Taxa de Substituição	(-)	0,817	1,079	0,965
Matéria Volátil	(%)	18,57	33,42	24,22
Carbono Fixo	(%)	58,39	78,28	66,48
Carbono	(%)	74,81	81,3	77,59
Hidrogênio	(%)	3,52	4,88	4,27
Oxigênio	(%)	1,81	8,79	6,06
Cinza	(%)	7,11	10,69	9,42

5.2 ANÁLISE DOS DADOS E GERAÇÃO DO MODELO

Por meio do *Statgraphics Plus*[®], foram avaliadas as principais variáveis que, a princípio teriam relação com a taxa de substituição de carvão do AF3.

Primeiramente, foi realizada a distribuição dos dados para uma análise criteriosa de todas as variáveis coletadas, verificando-se valores mínimos, máximos e médios de cada conjunto. Os valores considerados *outliers* foram eliminados do banco de dados.

Terminada a efetiva seleção dos dados, foram realizadas várias análises estatísticas utilizando-se o *Statgraphics Plus*[®] para determinar quais variáveis são realmente relevantes para descrever o modelo da taxa de substituição de carvão. A primeira é mostrada na figura 5.1. Trata-se de uma análise multivariável em que é possível observar se existe ou não dependência da taxa de substituição de carvão com cada uma das demais variáveis consideradas, sendo os respectivos coeficientes de correlação apresentados na Tabela V.2.

Observando-se o mosaico e os valores dos coeficientes de correlação originados dessa análise, verifica-se que somente as variáveis teores de carbono e de oxigênio, poder calorífico do carvão e, ainda, taxa de injeção no alto-forno possuem boa relação com a taxa de substituição, cada uma com valor de coeficiente de correlação maior que 0,45, em módulo. As demais se apresentam bastante dispersas e/ou sem qualquer relação. Contudo, conforme foi observado nas análises estatísticas preliminares, as variáveis teores de carbono e de oxigênio e poder calorífico estão correlacionadas entre si, influenciando de maneira equivalente a variável dependente, levando à conclusão de que somente uma delas basta, além da taxa de injeção para descrever o modelo final da taxa de substituição. Sendo assim, para simplificação do modelo e sem qualquer perda de qualidade, pode-se escolher qualquer uma dessas três variáveis. No caso, a variável teor de carbono foi escolhida, ficando o modelo final em função das variáveis taxa de injeção no alto-forno e teor de carbono.

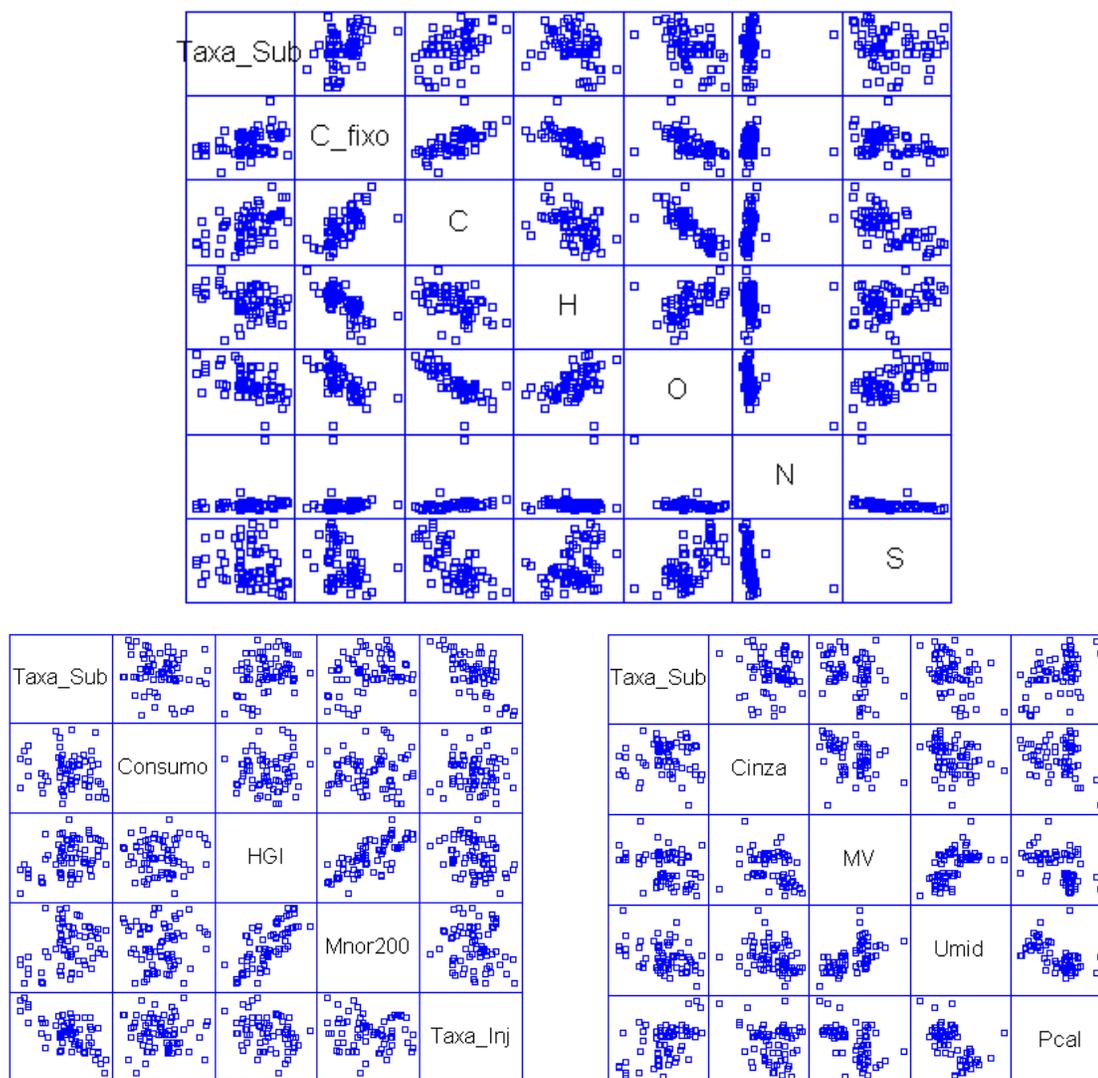


FIGURA 5.1 – Mosaico dos diagramas de dispersão entre a taxa de substituição e as demais variáveis.

TABELA V.2 – Valores dos coeficientes de correlação originados pelo mosaico dos diagramas de dispersão.

Coeficientes de correlação entre a taxa de substituição e demais variáveis					
Variável	Valor	Variável	Valor	Variável	Valor
Taxa de Injeção	-0,6467	Carbono fixo	0,3643	Enxofre	-0,1690
Poder Calorífico	0,4989	HGI	0,3639	Nitrogênio	0,1602
Carbono	0,4978	MV	-0,3437	Consumo	-0,1307
Oxigênio	-0,4719	Hidrogênio	-0,3109	Cinza	0,0319
Umidade	-0,3824	Menor200	0,2962		

Em seguida, foram analisadas as evoluções das quatro variáveis consideradas mais relevantes com a taxa de substituição, mostradas na figura 5.2.

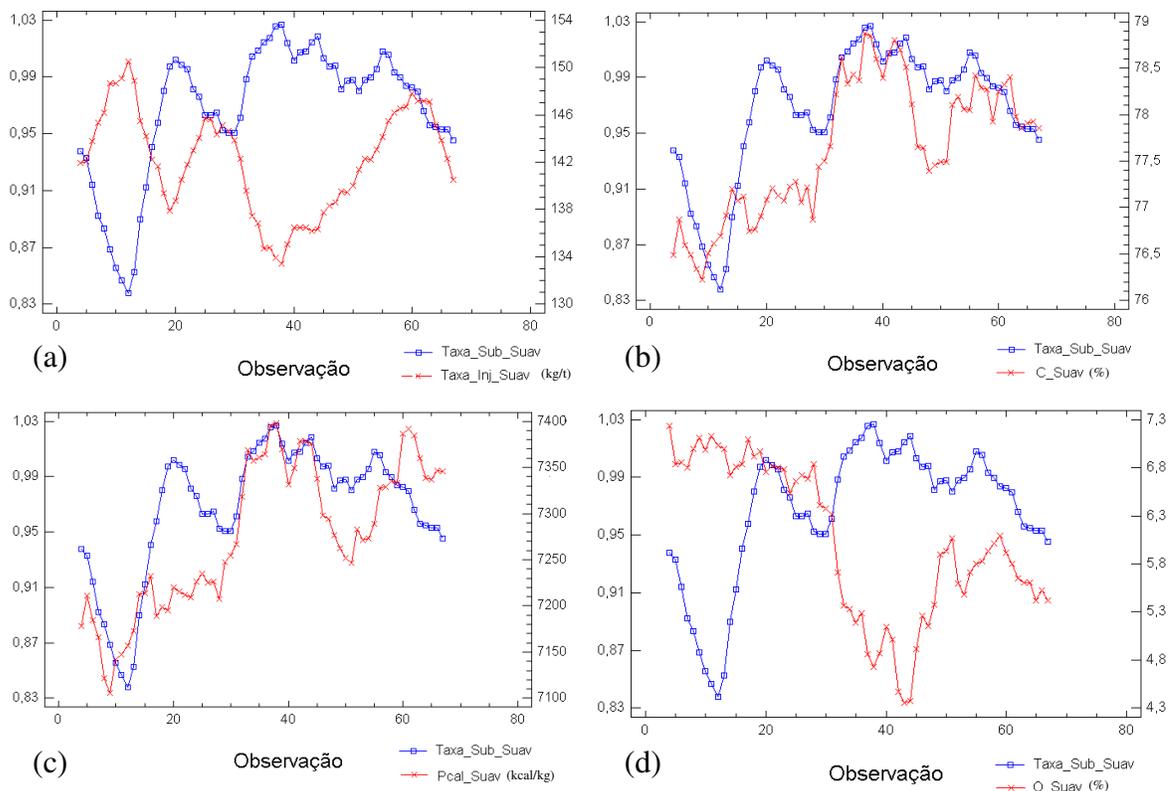


FIGURA 5.2 – Evolução da variável dependente com as independentes consideradas nas análises múltiplas (a) Taxa de Substituição x Taxa de Injeção; (b) Taxa de Substituição x Carbono; (c) Taxa de Substituição x Poder Calorífico; (d) Taxa de Substituição x Oxigênio.

Observa-se (figura 5.2) as mesmas tendências relatadas anteriormente, ou seja, a taxa de substituição possui relação inversa com o teor de oxigênio e com a taxa de injeção, aumentando com a diminuição desses dois, e, relação direta com o teor de carbono e com o poder calorífico, aumentando com a elevação destes últimos.

Finalmente, sabendo-se que essas quatro variáveis são relevantes estatisticamente para originar o modelo requerido, partiu-se para uma regressão múltipla linear, utilizando-se também o *Statgraphics Plus*[®]. Com o objetivo de otimizar e simplificar o modelo sem perda de qualidade final, selecionou-se uma opção no processamento da regressão múltipla (*Forward Selection*) que verifica se há conjuntos de variáveis exercendo influências semelhantes na variável dependente. Como foi visto nas análises

preliminares, esse comportamento é observado em três variáveis relevantes. Logo, somente uma foi escolhida para a equação do modelo final (equação 5.2), ficando a taxa de substituição em função do teor de carbono (C) e da taxa de injeção (Taxa_Inj). Vale ressaltar que o mesmo procedimento pode ser feito selecionando-se todas as variáveis estudadas, resultando no mesmo modelo final:

$$Taxa_Sub = 100 \cdot (61,675 + 1,462 \cdot C - 0,554 \cdot Taxa_Inj) \quad (5.2)$$

com r^2 de 51,50%.

O resíduo para a regressão múltipla é mostrado na figura 5.3. Observa-se uma sazonalidade sem causa aparente. Isso significa que pode haver influência de alguma outra variável ou parâmetro não considerado na análise estatística para determinar o modelo.

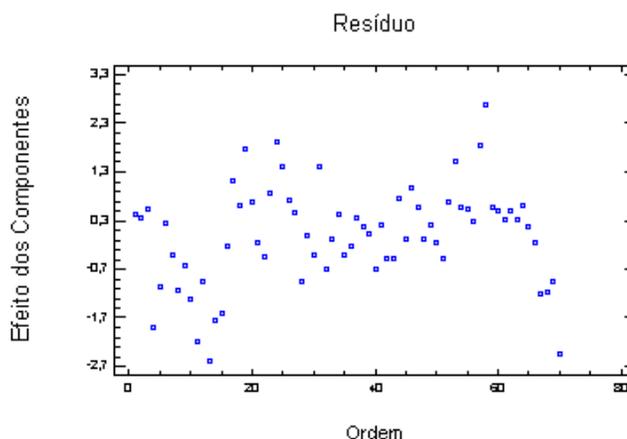


FIGURA 5.3 – Resíduo originado da regressão múltipla do modelo.

Além da relação dada pela equação 5.2, foram sugeridas outras duas, considerando a razão carbono/taxa de injeção ($C/Taxa_Inj$), uma vez que o teor de carbono é diretamente proporcional à taxa de substituição, enquanto a taxa de injeção é inversamente proporcional. As equações 5.3 e 5.4 mostram essas relações:

$$\text{- linear} \rightarrow Taxa_Sub = a \cdot \left(\frac{C}{Taxa_Inj} \right) + b; \quad (5.3)$$

$$\text{- logarítmica} \rightarrow Taxa_Sub = a \cdot \ln \left(\frac{C}{Taxa_Inj} \right) + b. \quad (5.4)$$

É importante salientar que a razão $C/Taxa_Inj$ é, por si só, um termo não linear.

Após regressão simples das equações 5.3 e 5.4, chega-se ao resultado mostrado nas equações 5.5 e 5.6:

$$- \text{ linear } \rightarrow Taxa_Sub = 1,5386 \cdot \left(\frac{C}{Taxa_Inj} \right) + 0,1218 \quad (5.5)$$

com r^2 de 49,91% e coeficiente de correlação de 0,7065;

$$- \text{ logarítmica } \rightarrow Taxa_Sub = 0,8542 \cdot \ln \left(\frac{C}{Taxa_Inj} \right) + 1,48 \quad (5.6)$$

com r^2 de 50,54% e coeficiente de correlação de 0,7109.

Os gráficos da regressão das equações 5.5 e 5.6 estão relacionados na figura 5.4.

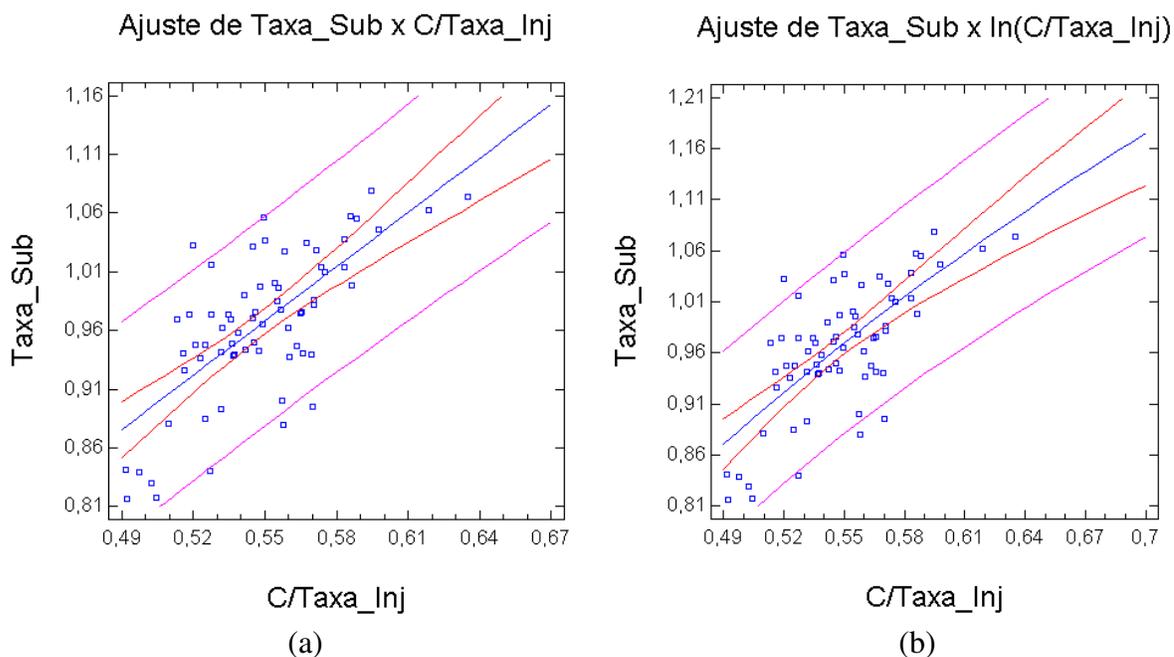


FIGURA 5.4 – Regressão simples das equações 5.5 (a) e 5.6 (b).

5.3 *DISCUSSÃO DOS RESULTADOS*

Referente aos estudos bibliográficos sobre taxa de substituição de carvão, há uma tendência natural dos autores adotarem correlações baseadas em alguns parâmetros de análises elementares, de características físicas e químicas do carvão utilizado, e de dados do processo, sobretudo taxa de injeção no alto-forno. Contudo, não há uma única relação capaz de descrever e equacionar de forma generalizada a taxa de substituição em função daqueles parâmetros. Cada planta industrial possui suas particularidades, sendo necessária uma análise criteriosa para verificar quais variáveis são relevantes no processo, a fim de se obter o modelo adequado.

A equação para a taxa de substituição de carvão utilizada pela Cosipa⁽¹⁹⁾ está fortemente relacionada com a taxa de injeção de carvão através das ventaneiras, assim como a originada neste estudo. A fórmula final da Cosipa não considera dados de análise elementar devido à falta de aparelhagem para tais análises.

Dos modelos apresentados para taxa de substituição para o AF3 da Usiminas, verifica-se uma proximidade muito grande entre os valores de seus r^2 , da ordem de 50%, sendo possível optar por qualquer um deles para ser empregado operacionalmente, fato que pode ser comprovado ao analisar a figura 5.5, em que se observa um gráfico com os valores industriais coletados e os modelos originados neste estudo. Os valores de coeficiente de correlação dos modelos não lineares (equações 5.5 e 5.6), da ordem de 0,7, são apropriados nesta análise estatística.

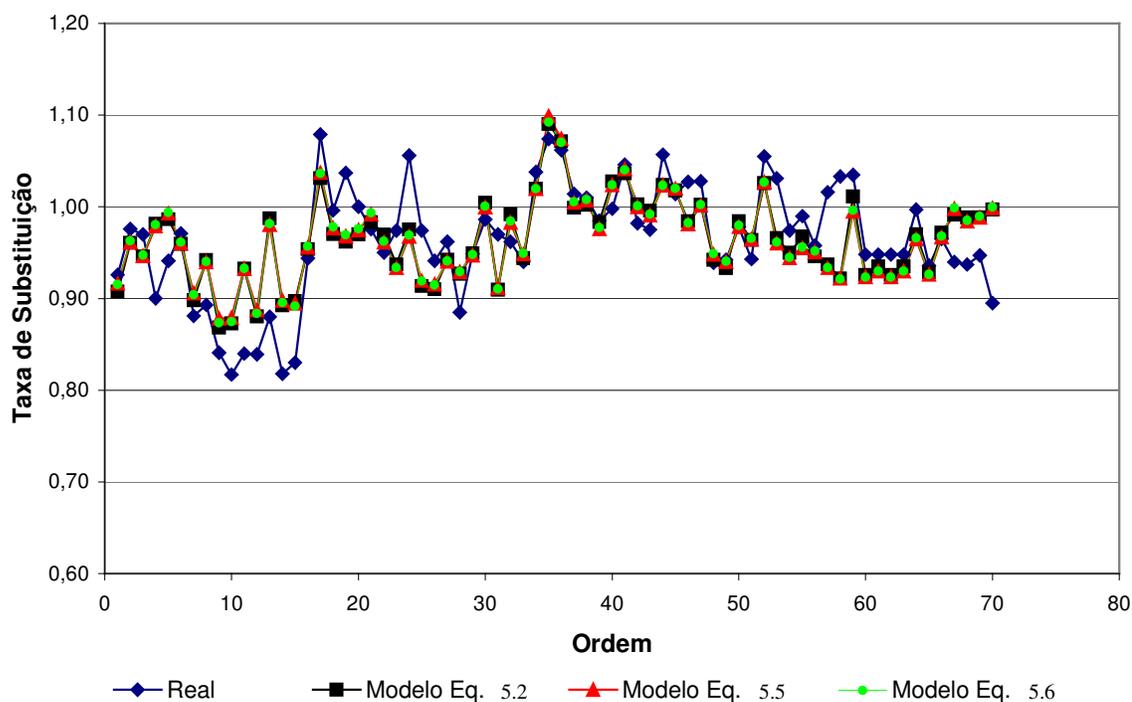


FIGURA 5.5 – Comparação entre dados operacionais coletados (Real) e modelos originados para taxa de substituição para o AF3 (Modelo das equações 5.2, 5.5 e 5.6, respectivamente).

A análise para regressão múltipla do *Statgraphics Plus*[®], que originou o modelo dado pela equação 5.2, não fornece como resultado o coeficiente de correlação, não sendo possível compará-lo com os demais. Contudo, estima-se que esse valor deve aproximar-se também de 0,7, tomando-se como referência os valores de r^2 e o gráfico da figura 5.5, onde observa-se uma coincidência muito grande na evolução dos três modelos plotados.

Ainda com relação à figura 5.5, verifica-se que os modelos se ajustaram muito bem aos dados reais, principalmente na região central do gráfico, onde foram encontrados erros percentuais menores que 1% entre o modelo e o dado real. Em algumas pequenas regiões o modelo apresentou certas discordâncias, sobretudo na extremidade final, situação em que foi verificado erro percentual de até 11,70%.

A distribuição dos resíduos de cada regressão para estimação dos modelos parece não seguir exatamente uma distribuição normal, principalmente para a equação 5.5 (Regressão Linear), conforme mostrado na figura 5.6.

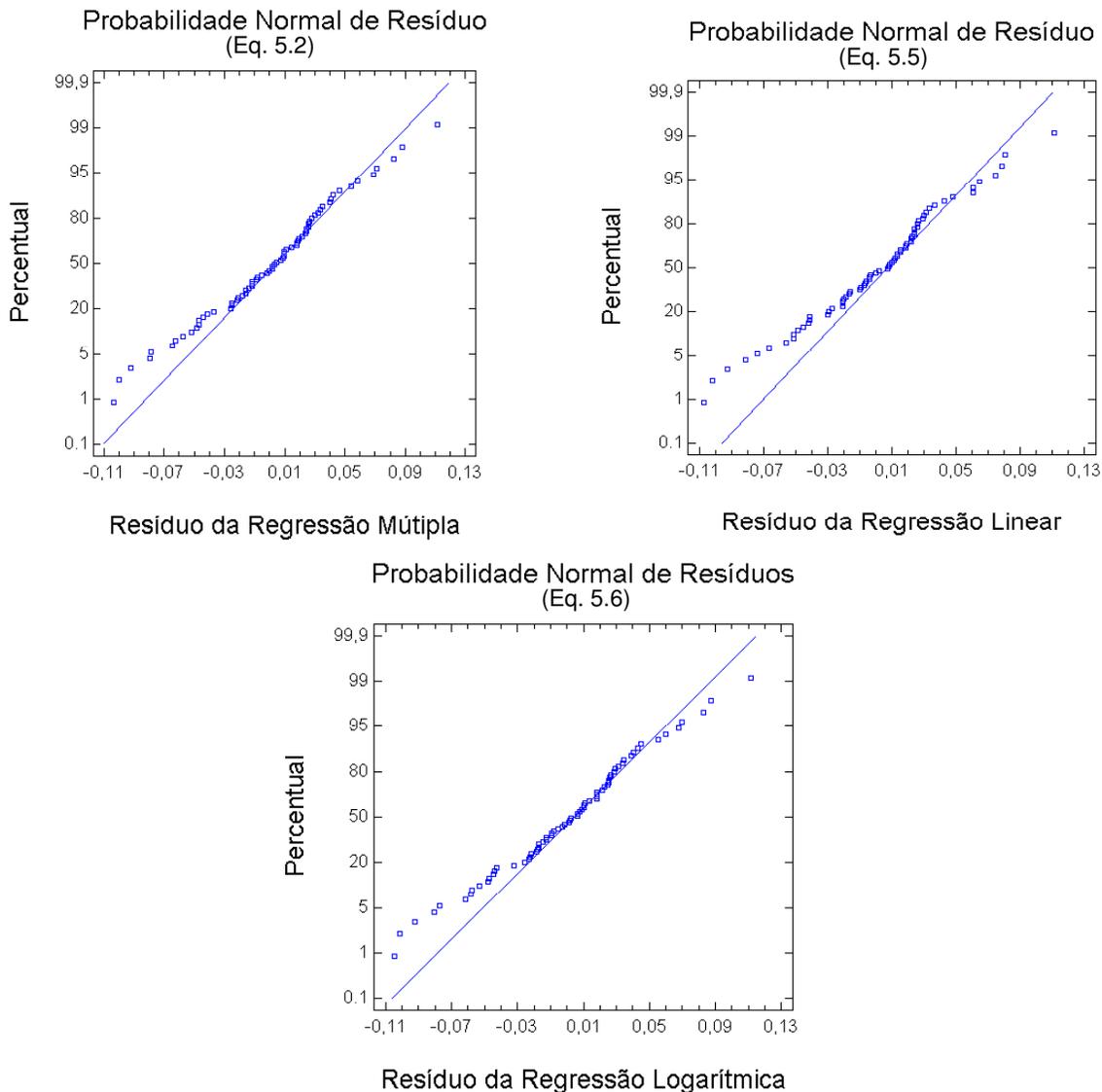


FIGURA 5.6 – Distribuição dos resíduos das regressões dos modelos.

Tal fato pode estar associado ao comentário feito anteriormente em relação à figura 5.3: provavelmente existe(m) parâmetro(s) não considerado(s) nesta análise estatística, prejudicando a performance final dos ajustes. Ainda sim, é aconselhável empregar um desses modelos para substituir a forma de cálculo efetuada atualmente pela Usiminas para a taxa de substituição de carvão do AF3.

5.4 ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO DO FUEL-RATE QUANDO DA ALTERAÇÃO DO TIPO DE CARVÃO INJETADO

Como visto na revisão bibliográfica, cada carvão possui um poder calorífico específico e quanto mais elevado o valor dessa propriedade, melhor é o combustível e menor a quantidade que deve ser injetada para uma determinada carga do alto-forno. Para valores menores, a taxa de injeção deve ser aumentada para compensar a queda do poder calorífico, considerando a mesma carga. Logo, a troca de carvão ou da mistura injetada nas ventaneiras, com alteração do poder calorífico, causa variação térmica no alto-forno, sendo necessário prever o quanto de combustível (*fuel-rate*) compensa esta variação.

Uma metodologia utilizada para quantificar a variação do *fuel-rate* em função da variação do poder calorífico do carvão foi sugerida pela *Nippon Steel Corporation*, consistindo, inicialmente, em plotar os valores da taxa de substituição em função do poder calorífico. Após linearização dos dados plotados, encontra-se uma correlação (taxa de substituição x poder calorífico), do tipo $y = ax + b$. O inverso do coeficiente angular desta correlação resulta a equivalência do aporte térmico (energia retirada ou fornecida) para cada kg de *fuel-rate*.

A metodologia aplicada nesse trabalho (item 5.2) originou três equações (5.2, 5.5 e 5.6) para o cálculo da taxa de substituição. Para a estimativa da variação do *fuel-rate* quando da alteração do tipo de carvão ou mistura injetada nas ventaneiras do alto-forno, tomou-se a equação 5.2 (taxa de substituição em função do teor de carbono e da taxa de injeção, obtida por regressão múltipla). Os valores de taxa de substituição obtidos foram então, plotados em função do poder calorífico do carvão ou da mistura de carvões utilizados no AF3 da Usiminas, conforme figura 5.7 (a). O gráfico da regressão para a correlação anterior é apresentado na figura 5.8.

No desenvolvimento das equações para o cálculo da taxa de substituição foi encontrado um valor baixo para r^2 . Uma das justificativas pode ser o extenso período utilizado nas avaliações (set/02 a dez/06), no qual, há uma variação acentuada dos parâmetros operacionais do alto-forno, afetando cada valor médio de taxa de injeção. Pela regressão simples, obteve-se um coeficiente de correlação de 0,67, considerado adequado em se tratando de dados industriais.

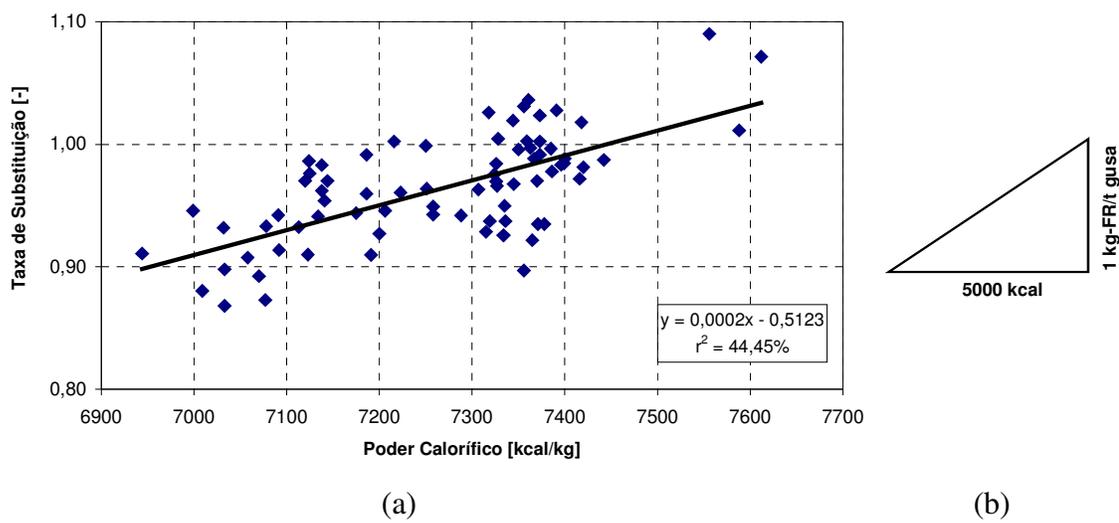


FIGURA 5.7 – Relação entre a taxa de substituição e o poder calorífico (a) e equivalência do aporte térmico para cada kg de *fuel-rate* (b).

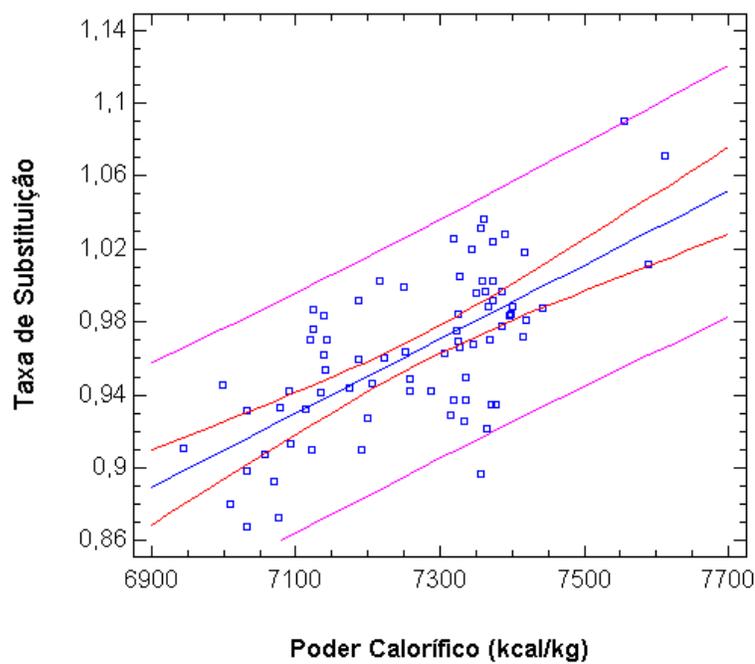


FIGURA 5.8 – Regressão simples da taxa de substituição x poder calorífico.

O valor encontrado para a equivalência do aporte térmico para cada kg de *fuel-rate* foi de 5000kcal para cada 1kg no *fuel-rate* como representado na figura 5.7 (b). Por exemplo, considerando uma taxa de injeção de 100kg/t de gusa, quando da troca de um carvão com poder calorífico de 7500kcal/kg para outro, de 7700kcal/kg, a variação no *fuel-rate* é de - 4kg/t gusa, ou seja, para uma mesma carga, a taxa de injeção pode ser reduzida em 4kg/t gusa.

Essa correção da variação do *fuel-rate* (*coke-rate*) muito contribui na estabilidade do processo, já que as trocas dos carvões (ou misturas de carvões) injetados, em maior ou menor escala, sempre ocasionam variações na operação (marcha) do alto-forno.

Como referência é apresentado o modelo de estimativa da variação do *fuel-rate* quando da alteração do tipo de carvão injetado, até então, adotado nos altos-fornos da Usiminas. O modelo, sugerido pela *Nippon Steel Corporation*, apresenta uma equivalência de 3600kcal para cada 1kg no *fuel-rate*, baseada em análises estatísticas próprias.

Quando ocorre uma troca do carvão (ou mistura) injetado, faz-se uma simulação, buscando estimar a variação no *fuel-rate* (*coke-rate*). Essa simulação é baseada na equivalência de 3600kcal/kg para cada 1kg no *fuel-rate* e os resultados auxiliam no controle térmico do alto-forno.

Para exemplificar é mostrada a Tabela V.3, na qual tem-se os resultados da simulação realizada quando da troca da mistura de carvões (A + B) pela mistura dos carvões (C + D). Baseando-se na taxas de injeção praticadas nos altos-fornos, na variação do poder calorífico das misturas de carvões e na equivalência de 3600kcal/kg, obtém-se as estimativas das variações no *coke-rate*. No caso, os cálculos mostraram que a troca das misturas de carvões tem uma influência relevante no *fuel-rate* (reduções no *fuel-rate* em torno de 7,0kg/t nos AF's 1 e 2 e de 8,0kg/t no AF3). São então, sugeridas alterações prévias nos altos-fornos, levando-se em conta os resultados da simulação e o estado térmico do forno na hora da mudança (sugere-se, por exemplo, reduções em torno de 5,0kg/t no *fuel-rate*).

TABELA V.3 – Cálculo da mudança de carvão nos altos-fornos.

AF	Poder Calorífico		PCR	Variação Coke Rate
	Atual	Novo		
1	7259	7461	120,0	-6,714
2	7259	7461	120,0	-6,714
3	7259	7461	140,0	-7,833

Carvão	A	B	Atual
%	57	43	Média
PCI	7417	7050	7259
C	8040	7510	78,12
H	290	354	3,18
O	496	815	6,33
N	177	180	1,78
S	51	62	0,56

Carvão	C	D	Novo
%	40	60	Média
PCI	7241	7607	7461
C	7760	8170	80,06
H	322	343	3,35
O	621	420	5,00
N	186	177	1,81
S	61	59	0,60

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho, além de uma revisão bibliográfica, foram avaliados dados operacionais do Alto-Forno 3 da Usiminas e das análises de carvão para injeção, no período de setembro de 2002 a dezembro de 2006.

De acordo com a literatura, não há uma única relação capaz de descrever e equacionar de forma generalizada a taxa de substituição de carvão. Cada planta industrial possui suas particularidades, sendo necessária uma análise criteriosa para verificar quais variáveis são relevantes no processo, a fim de se obter o modelo adequado. Os parâmetros mais utilizados para descrevê-lo são: taxa de injeção no alto-forno, teores de carbono e de oxigênio, poder calorífico e percentagem de matéria volátil do carvão. A taxa de substituição é inversamente proporcional à taxa de injeção, à percentagem da matéria volátil e ao teor de oxigênio, e diretamente proporcional ao teor de carbono e ao poder calorífico.

Referente à análise estatística dos dados coletados, observou-se que as variáveis relevantes estatisticamente para originar o modelo da taxa de substituição para o AF3 são o teor de carbono e a taxa de injeção, sendo esta última fortemente relacionada à variável dependente. Três equações foram geradas a partir dessas variáveis, obtendo-se valores de coeficiente de correlação para cada uma de aproximadamente 0,7, considerado adequado em se tratando de dados industriais.

Os resíduos originados da regressão de cada modelo não seguem exatamente uma distribuição normal, devido provavelmente à influência de algum parâmetro não considerado na análise estatística deste trabalho. Ainda sim é possível utilizar qualquer uma das relações originadas para estimativa da taxa de substituição de carvão, visto que os modelos se ajustaram bem aos dados reais e à proximidade nos valores dos r^2 obtidos.

A estimativa da variação do *fuel-rate* (*coke-rate*) quando da alteração do tipo de carvão injetado nas ventaneiras do alto-forno é uma ferramenta auxiliar para os especialistas de alto-forno na tomada de decisões. Contribui na busca contínua da estabilidade do processo e na manutenção dos elevados níveis de produtividade e altas taxas de injeção

de finos, favorecendo ainda, a redução dos custos de produção de gusa com que opera o AF3 da Usiminas.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em primeiro lugar, deve ser verificada a validade do modelo desenvolvido, após sua implantação no Alto-Forno 3 da Usiminas.

Sugere-se buscar o aprimoramento da equação utilizada para o cálculo da taxa de substituição coque/carvão, aplicando-se, periodicamente, a metodologia desenvolvida. O mesmo pode ser adotado para a estimativa da variação do consumo de combustíveis quando da troca do tipo de carvão (ou mistura) injetado nas ventaneiras do alto-forno.

Também podem ser desenvolvidos novos estudos, baseados na metodologia aplicada, com maior número de variáveis, de forma a obter modelos e equações que permitem reproduzir as condições operacionais mais próximas da realidade do Alto-Forno 3 da Usiminas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) CAMPOS, V. F. – Tecnologia da fabricação de ferro gusa em alto-forno. Curso UFMG/Fundação Christiano Ottoni, Belo Horizonte, MG, Maio, 1984.
- 2) PIMENTA, H. P.; PACHECO, T. de A.; AZEVEDO, A. L. T. de – Characterization of structure of blast furnace sinter and its behaviour during reduction at low temperatures. In: International Symposium on Agglomeration, 6, Japan, 1993. p. 310-314.
- 3) FERNANDES, M. V. - Operação de altos-fornos e equipamentos auxiliares. Curso interno da Usiminas, Ipatinga-MG, 2004.
- 4) REIS, H. M. B.; SESHADRI, V.; ULHÔA, M. B. – Influence of pulverized coal nature on its combustibility into the blast furnace raceway. International Seminar on Mineral Processing Technology (MPT), January, 6 to 8, 2005 – Dhanbad, Bihar, Indian.
- 5) CASTRO, L.F.A. de; CARNEIRO, R. T. S.; ULHÔA, M. B.; TAVARES, R. P. - Injeção de carvão pulverizado nas ventaneiras do alto-forno - Contrato de Cooperação Técnica entre Usiminas e Fundação Cristiano Ottoni, Belo Horizonte, Outubro, 1997.
- 6) HUTNY, W. P.; GIROUX, L.; PRICE, J. T. et alii - Quality of coal for blast furnace injection. AISE Specialty Conference, Pittsburgh. Blast Furnace Injection Symposium, p. 1-31, 1996.
- 7) CARNEIRO, R. T. S.; CASTRO, J. B. de; GIUDICE, F. D. de P.; - Metodologia de seleção de carvões para injeção em altos-fornos. 2º Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais, ABM, São Paulo, SP, Outubro, 1997.
- 8) HAYWOOD, R. J.; TRUELOVE, J. S.; McCARTHY, M. J. – Modelling of pulverized coal injection and combustion in blast furnace. In: Ironmaking Conference, 53, 1994, Chicago. Proceedings. Warrendale: The Iron a Steel Society. 1994, p. 437-442.
- 9) UENO, H.; YAMAGUCHI, K.; TAMURA, K. – Coal combustion in the raceway and tuyere of a blast furnace. ISIJ International, v. 33, n. 6, p. 640-645, 1993.
- 10) YAMAOKA, H. and KAMEI, Y. – Experimental study on na oxygen blast furnace process using a small test plant. ISIJ International, v. 32, n. 6, p. 709-715, 1992.
- 11) YAMAGATA, C.; SUYAMA, S.; HORISAKA, S. et alii – Fundamental study on combustion of pulverized coal injected into coke bed at right rate. ISIJ International, v. 32, n. 6, p. 725-732, 1992.
- 12) CARNEIRO, R. T. S.; CASTRO, J. B. de – Estudo de otimização de misturas de carvões para injeção nos altos-fornos. Relatório final de estudo de P&D, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, Ipatinga-MG, Agosto, 1999.
- 13) WILLMERS, R. R.; POULTNEY, R. M. - Coke in the blast furnace. Cokemaking International, Vol. 4, nº 1, 1992.
- 14) SESHADRI, V.; LAHIRI, A. K. - Fuel injection in the blast furnace. Transactions of the Indian Institute of Metals, p. 25-28, September, 1968.

- 15) SESHADRI, V.; LAHIRI, A. K. - Effect of operating variables on the fuel replacement ratio in the blast furnace. *Journal of the Iron and Steel Institute*, p. 578-581, May, 1969.
- 16) HUTNY, W. P.; PRICE, J. T.; GRANSDEN, J. F. – Evolution of coals for blast furnace injection using a computer model. *Ironmaking Conf. Proc.*, 1990.
- 17) BROUWER, R. C.; TOXOPEUS, H. L. – Massive coal injection at Hoogovens IJmuiden BF's, *Revue de Metallurgie. Cahiers d'Informations Techniques*, v. 88, n. 4, April/1991.
- 18) BENNETT, P. A. - The benefits of low volatile coals for the PCI Market. - XXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro da ABM, Vitória-ES, 01 a 03 de Dezembro, p. 31-47, 1997.
- 19) MARANHA, S. P. D. – Equação Cosipa de previsão da taxa de substituição coque/carvão para o PCI. XXXVI Simpósio Técnico da U-IPQ – Usiminas. Setembro, 2006.
- 20) KORTAS, B. et alii – Injection and Combustion of Coal in a Blast Furnace. *Iron and Steel Engineer*, v. 60, p. 33-37, 1983.
- 21) CARNEIRO, R. T. S.; CASTRO, J. B. de; GIUDICE, F. D. de P. – Combustibilidade de carvões para injeção em altos-fornos. Relatório final de estudo de P&D, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, Ipatinga-MG, Maio, 1997.
- 22) WEBER, S. H. J. V. – Caracterização de Misturas de Finos de Carvão Vegetal e Mineral para Injeção nas Ventaneiras do Alto-Forno. Dissertação de Mestrado, UFMG, 89p, 1990.
- 23) TAKEDA, K. et alii – Effect of Coal Particles on Combustibility of Coal Injected to Blast Furnace. *Ironmaking Conference Proceeding*, p. 455-464, 1990.
- 24) SUZUKI, T.; UEHARA, T.; AKEDO, H. - Combustion characteristics of pulverized coal for blast furnace coal injection. *Ironmaking Conference Proceedings*; p. 465-471, 1990.
- 25) UNSWORTH, J. F. et alii – Coal Quality and Combustion Performance – An International Perspective. *Coal Science Technology 19*, Elsevier, The Netherlands, 1991.
- 26) YAMAGUCHI, K.; UENO, H.; TAMURA, K. – Maximum injection rate of pulverized coal into blast furnace through tuyeres with consideration of unburnt char. *ISIJ International*, v. 32, n. 6, p. 716-724, 1992.
- 27) CASTRO, L. F. A.; TAVARES, R. P. – Efeitos da injeção de carvão pulverizado nas condições operacionais do alto-forno. 53º Congresso Anual da ABM, pp. 2004-2018. Setembro, 1998.
- 28) BROUWER, R. C.; SCHOONE, E. E.; TOXOPEUS, H. L. – Coal injection driven to the limits. *Iron and Steel Engineer*. Dezembro, 1992, pág. 20-25.
- 29) MAKI, A.; SAKAI, A.; TAKAGAKI, N. et alii – High rate coal injection of 218kg/tHM at Fukuyama nº4 Blast Furnace. *ISIJ International*, v. 36, n. 6, p. 650-657, 1996.

- 30) PETERS, K. H.; PETERS, M.; KORTHAS, B. et alii – Limits of coal injection. Metallurgical Plant and Technology International, nº 6, 1990, págs. 32-43.
- 31) YAMAGUCHI, K.; UENO, H.; MATSUNAGA, S. et alii – Test on high-rate pulverized coal injection operation at Kimitsu nº 3 Blast Furnace. ISIJ International, vol. 35, n. 2, 1995, pág. 148-155.
- 32) YOSHIDA, Y.; TANAKA, K.; TADA, S. et alii – High coal injection rate operation in Kobe n. 3 BF. In: Ironmaking Conference, 50, Washington, p. 517-522, 1991.