

DETERMINAÇÃO DA COMBUSTÃO DE CARVÃO VEGETAL PULVERIZADO EM UM SIMULADOR DE INJEÇÃO PARA AUMENTO DA TAXA DE INJEÇÃO NOS ALTOS-FORNOS DA V&M DO BRASIL¹

Rafael Porto Oliveira²

Paulo Santos Assis³

Hélio Maneta⁴

Fábio Diniz⁵

Guilherme Borges da Costa⁶

Resumo

O presente trabalho mostra os materiais usados em uma pesquisa de combustão de carvão vegetal com parâmetros diversos. Descreve detalhadamente a unidade onde os ensaios foram feitos e as condições nas quais os materiais foram submetidos aos ensaios. Os resultados obtidos são analisados considerando resultados práticos e experimentais. Os resultados mostraram que: a qualidade do carvão vegetal exerce um papel importante no índice de combustão; a taxa de injeção de carvão e o enriquecimento do ar em oxigênio são fatores antagônicos à taxa de combustão; a temperatura do processo no forno, onde ocorre a combustão exerce um pequeno efeito na taxa de combustão. De posse dos resultados, foi criada uma equação obtida por regressão linear múltipla para simular a taxa de combustão para fatores diversos.

Palavras-chave: Combustão; Carvão vegetal; Injeção.

DETERMINATION OF PULVERIZED CHARCOAL COMBUSTION USING A INJECTION SIMULATOR IN ORDER TO INCREASE THE PCI IN THE V&M DO BRASIL'S BLAST FURNACES

Abstract

This report shows the used materials in the combustion research using charcoal with different parameters. It describes the laboratory unit where the trials were done, so the conditions for the test as well. All obtained results were analyzed considering some operational parameters. It was concluded: the charcoal quality has a high influence in the combustion rate; the powder coal injection rate and the oxygen enrichment in the air have opposite effect in the combustion rate; the process temperature into the furnace, where the reactions take place, has limited effect on the combustion rate. Based on the obtained results, a multiple regression among the operational parameters was made in order to simulate the combustion rate in many situations.

Key words: Combustion; Charcoal; Injection.

¹ *Contribuição técnica ao XXXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 18 a 21 de setembro de 2007, Salvador - BA, Brasil.*

² *Engenheiro Metalurgista, Gerência de Produção de Ferro Gusa da V&M do Brasil*

³ *Engenheiro Metalurgista, M. Sc.; D. Ing., Professor da Escola de Minas da UFOP.*

⁴ *Engenheiro Metalurgista, Gerente dos Altos-Fornos da Gerência de Produção de Ferro Gusa da V&M do Brasil.*

⁵ *Estagiário Técnico em Metalurgia, Gerência de Produção de Ferro Gusa da V&M do Brasil.*

⁶ *Estagiário de Engenharia Metalúrgica da UFMG, Gerência de Produção de Ferro Gusa da V&M do Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O projeto consistiu na seleção de diferentes carvões vegetais, sua preparação, caracterização física (distribuição granulométrica) e química, e nos ensaios de combustão em uma unidade de elevado gradiente térmico para determinação de taxas de combustão.

Este projeto foi criado na busca de conhecimento sobre algumas variáveis do processo de produção de ferro gusa que tem influência na combustão do carvão pulverizado bem como as qualidades físicas e químicas do carvão vegetal pulverizado necessárias para garantir sua combustão na zona de combustão. Com a garantia de combustão do carvão pulverizado na zona de combustão, é possível a prática de taxas de injeção mais elevadas mantendo adequada a taxa de substituição entre o carvão carregado pelo topo do alto-forno e o carvão pulverizado injetado pelas ventaneiras.

O projeto de pesquisa foi financiado pela V&M do Brasil e teve início em março de 2006. Inicialmente, foi usada a unidade existente no laboratório de siderurgia da Escola de Minas da UFOP. Ensaios a vazio foram realizados e posteriormente iniciaram-se os ensaios a quente. Testes com os dois ORSAT foram realizados na V&M do Brasil para se assegurar de que não se teriam dúvidas com relação às determinações químicas feitas nos dois equipamentos existentes no laboratório de Siderurgia da Escola de Minas da UFOP, cotejados com o existente no laboratório químico da V&M no Barreiro.

O presente trabalho mostra todas as informações e resultados obtidos, uma avaliação dos mesmos e as conclusões obtidas através do projeto de pesquisa.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Levantamento de Dados

Para conhecimento de algumas variáveis operacionais na primeira etapa do desenvolvimento do projeto, foram levantados dados operacionais dos altos-fornos 1 e 2 da V&M do Brasil no ano de 2006. No tratamento dos dados foram selecionadas todas as variáveis necessárias, excluindo interferências devido a paradas dos altos-fornos. Este levantamento foi feito para correlacionar alguns resultados práticos para posterior comparação com os resultados obtidos em laboratório.

2.2 Seleção de Materiais

As amostras foram coletadas e preparadas no laboratório siderúrgico da V&M do Brasil para atender às características desejadas.

Os principais dados avaliados neste trabalho foram:

1. Características químicas inerentes ao redutor (umidade, carbono fixo).
2. Características físicas (distribuição granulométrica do carvão vegetal).
3. Variáveis do processo de combustão (temperatura e enriquecimento de O₂).
4. Variáveis do processo do alto-forno (taxa de injeção).

2.3 O Equipamento

Ao contrário de ensaios comuns de combustão de materiais combustíveis, os ensaios realizados neste trabalho foram conduzidos em condições similares ao que

ocorre no alto-forno. Ou seja, um elevado gradiente térmico (105 K.s^{-1}) e um baixo tempo de residência (da ordem de 10^{-2} s).

A Figura 1 ilustra o equipamento utilizado no trabalho. Este equipamento foi construído usando métodos similares adotados tanto na China, quanto na Alemanha. Neste simulador, pode-se ver, do lado esquerdo ao fundo, a região de baixa pressão que simula o sistema de injeção antes do carvão pulverizado adentrar nas ventaneiras. Na parte frontal, ao lado do sistema de controle da unidade (caixa cinza com as botoeiras), observa-se a região com elevada pressão, onde se situa um manômetro para medição da pressão reinante. Esta região é fundamental, pois após a abertura das válvulas solenóide, cria-se uma onda de choque que vai garantir uma velocidade elevada no pó de carvão (que é alimentado em bocal situado a 10 cm a jusante da primeira válvula solenóide). Na região situada à direita da foto, tem-se o forno por onde o pó de carvão escoa e onde ocorre a combustão. Após a combustão, o gás é recolhido em uma ampola que é encaixada na mangueira vista a direita da unidade e o gás é analisado em um equipamento chamado ORSAT. Após a análise do gás e o uso de um modelo matemático que correlaciona os gases gerados, pode-se então calcular o índice de combustão do carvão pulverizado. Todas as regiões que estão submetidas a altas temperaturas são refrigeradas para evitar acidentes durante a operação da unidade. Na Figura 1 são indicados os principais pontos a que se referiram as explicações supracitadas.

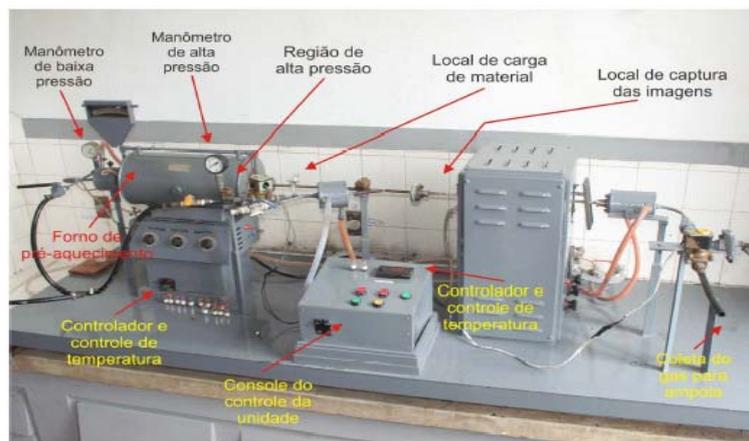


Figura 1 – Foto ilustrativa do equipamento usado para ensaios de combustão (Laboratório de Siderurgia da Escola de Minas – UFOP).

2.3.1 Avaliação no ORSAT

Para análise química, o gás coletado em ampolas instaladas ao final da unidade foi analisado utilizando o ORSAT. Estas ampolas de volumes variados de 200, 250 e 500ml são cheias com água colorida com soluções químicas de forma a visualizar o final do escoamento da mesma. No momento em que o gás preenche a ampola, os dois registros são fechados e o gás é então analisado no ORSAT. Deve ser salientado que as soluções para análise devem ser bem controladas.

2.3.2 Determinação do índice de combustão

De posse de todas as análises químicas do carvão, das condições dos ensaios, das condições operacionais do alto-forno e dos resultados das análises, foram calculadas as taxas de combustão do carvão através de um modelo desenvolvido. Abaixo, é apresentado o modelo (equação 1) usado para determinação da taxa de combustão (TC), definida de acordo com o ensaio.

$$TC = [(\%CO + \%CO_2) \cdot Vg \cdot \%Cf / ma] \cdot k \quad (1)$$

Onde:

- TC: taxa de combustão;
- % CO; % CO₂: análise do gás;
- Vg: volume do gás coletado, na ampola;
- %Cf: carbono fixo do carvão;
- ma: massa ensaiada;
- k: constante em função das condições dos ensaios e do alto-forno.

Os parâmetros básicos de operação da unidade foram pré-estabelecidos para:

Alta pressão: 5 bar.

Baixa pressão: 2 bar.

Temperatura do forno: variável. Para todos os ensaios onde não houve variação desta temperatura; estabeleceu-se um valor de *set-up* de 1275°C.

Vazão específica de ar: 1100 Nm³/tgusa.

Todos os valores eram anotados e posteriormente através do uso do modelo foi possível calcular a TC.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através de um levantamento de dados práticos, foi possível correlacionar a geração de pó do coletor e a permeabilidade com a taxa de injeção dos altos-fornos 1 e 2. As Figuras 2 e 3 ilustram os resultados obtidos.

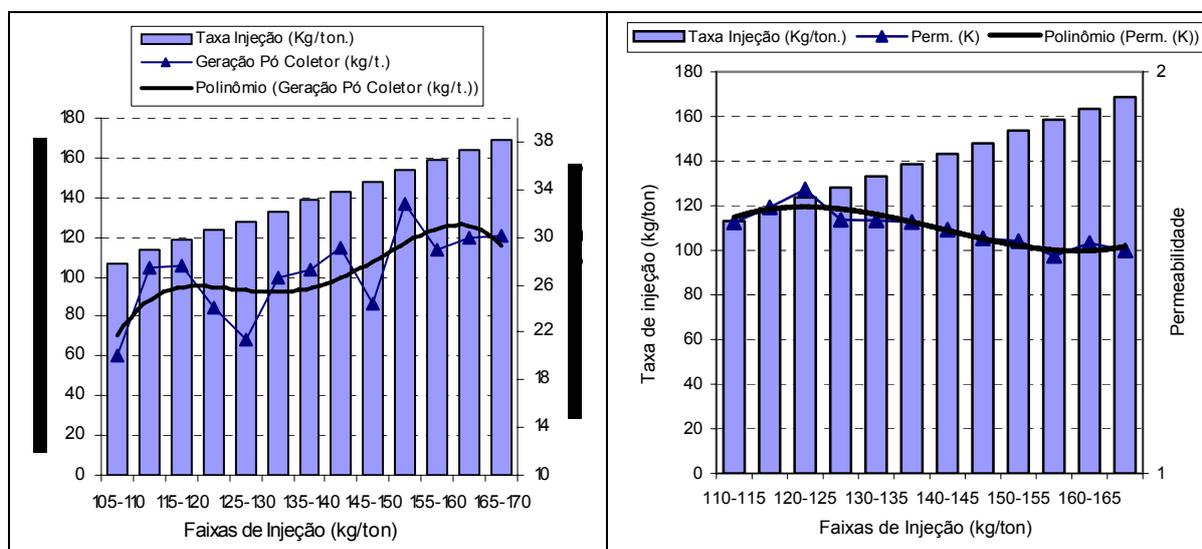


Figura 2: Geração de pó de coletor e variação da permeabilidade com a elevação da taxa de injeção no alto-forno 1.

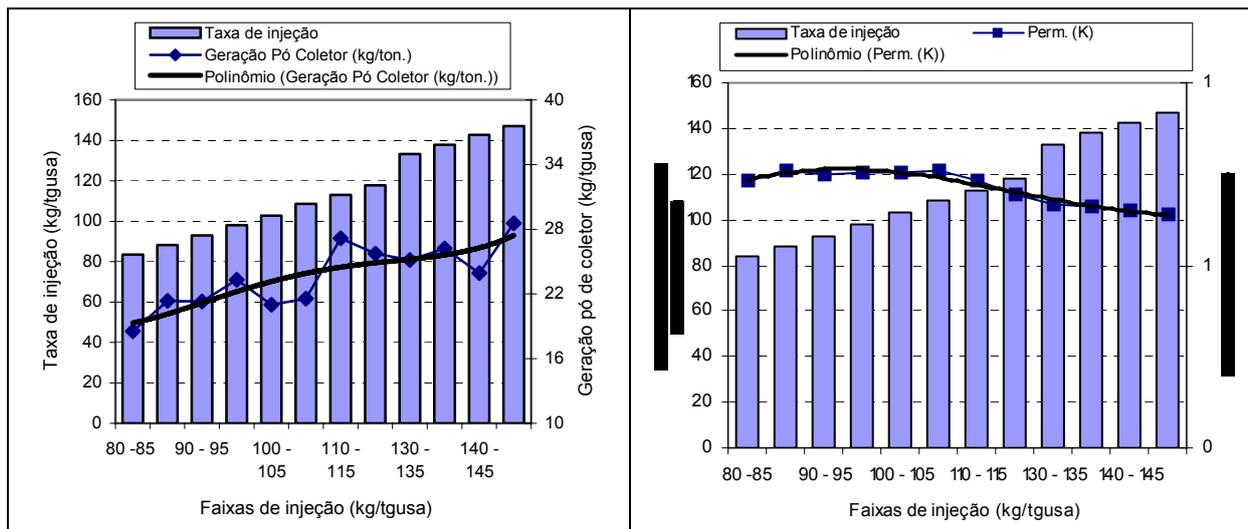


Figura 3: Geração de pó de coletor e variação da geração de pó de coletor com a elevação da taxa de injeção no alto-forno 2.

Com o aumento da taxa de injeção, observou-se uma tendência no aumento da geração de pó do coletor nos altos-fornos como mostrado nas Figuras 2 e 3. Esse aumento pode estar associado à não queima do carvão pulverizado na zona de combustão e as partículas não queimadas podem estar sendo arrastadas para o topo do alto-forno e retiradas no coletor de pó.⁽¹⁾ A correlação entre a taxa de injeção e a geração de pó do coletor apresentaram fortes coeficientes de correlação: 68% para o alto-forno 1 e 80% do alto-forno 2.

Outro fato observado na prática é a redução da permeabilidade com a elevação da taxa de injeção de carvão pulverizado. Este fato já era esperado uma vez que o carvão pulverizado está substituindo parte do carvão granulado carregado pelo topo do alto-forno que é o grande responsável pela permeabilidade da carga. Para o alto-forno 1, a correlação entre a taxa de injeção e a permeabilidade foi de -0,93% e para o alto-forno 2, de -94,5%.

Deve ser ressaltado que as partículas de carvão pulverizado não queimadas na zona de combustão afetam negativamente a permeabilidade da carga. No entanto, é necessário um estudo mais aprofundado para comprovar este fato na prática.

3.1 Efeito Individual de Diferentes Variáveis de Processo sobre a Taxa de Combustão do Carvão Vegetal Pulverizado

Foi verificado de forma geral que o aumento da taxa de combustão é afetada positivamente pelas seguintes variáveis, por ordem decrescente:

- Nível de enriquecimento do ar em oxigênio;
- Teor de carbono;
- Teor de umidade do carvão vegetal;
- Temperatura do forno 2;

E negativamente pelos seguintes parâmetros:

- Taxa de injeção de carvão vegetal;
- Tamanho de grão;

As Figuras 4 a 10 mostram os resultados diferenciados para cada variável, obtidas com os resultados dos ensaios de combustão. Deve ser salientado que, conforme retrata a literatura sobre o assunto e comprovado também neste estudo, a taxa de injeção exerce um papel importante na taxa de combustão. Todos os ensaios foram

realizados com a taxa de injeção de carvão pulverizado fixa com 150 kg por tonelada de gusa, com exceção do ensaio variando a taxa de injeção que está ilustrado na Figura 5.

3.1.1 Efeito da taxa de injeção

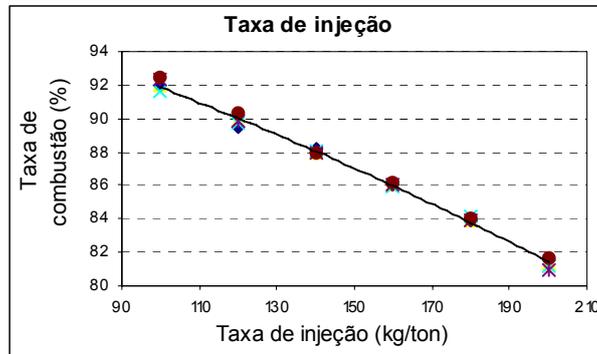


Figura 4 – Efeito da taxa de injeção de carvão pulverizado na taxa de combustão.

Ficou evidente o efeito da taxa de injeção de carvão pulverizado sobre a taxa de combustão. Quanto maior a taxa de injeção, menor a taxa de combustão de carvão pulverizado. A explicação para o fato se dá pela menor relação oxigênio/carbono disponível, à medida que se aumenta a taxa de injeção; estes fatos são corroborados pela literatura sobre o assunto.⁽²⁻⁴⁾ Observou-se um decréscimo de cerca de 2 % na taxa de combustão para cada aumento de 20 kg por tonelada de gusa. Quando a taxa é superior a 180 kg por tonelada de gusa, observou-se um decréscimo maior na taxa de combustão, atingindo 2,6 %, conforme ilustrado na Figura 4. Deve ser citado que dados obtidos no alto-forno 1 da V&M do Brasil apresentaram tendência no aumento do consumo de carvão de topo para taxas de injeção superiores à 175 kg/ton,⁽⁵⁾ conforme é mostrado na Figura 5.

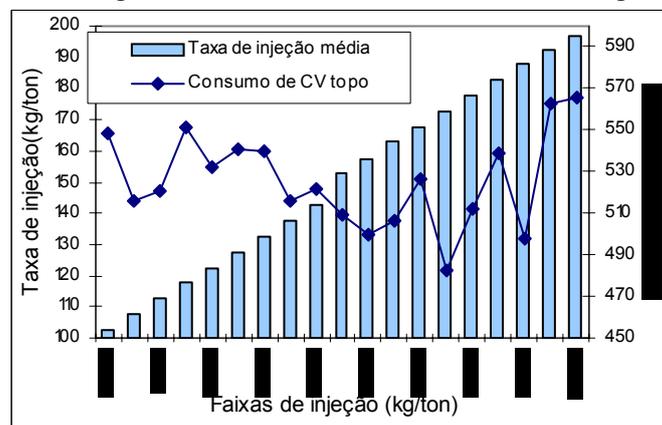


Figura 5 – Correlação entre o aumento da taxa de injeção e o consumo de carvão de topo do alto-forno 1 da V&M do Brasil para o ano de 2006.

3.1.2 Efeito do enriquecimento do ar em oxigênio

Outro parâmetro estudado foi o enriquecimento do ar em oxigênio. Foi observado que o aumento no enriquecimento do ar em oxigênio tem-se um aumento na taxa de combustão. Isto também pode ser explicado pela maior relação oxigênio/carbono nas ventaneiras do alto-forno devido ao enriquecimento. Foi observado que um aumento de 1 % no enriquecimento do ar em oxigênio têm-se aumentos de 1,8 a 1,4 % na taxa de combustão e à medida que se eleva o enriquecimento, este efeito é

menor na taxa de combustão, para uma taxa de injeção de carvão fixada em 150 kg por tonelada de gusa, indicando que o enriquecimento do ar pode ser usado como fator acelerador do processo de combustão para elevadas taxas de injeção. Naturalmente, a questão econômica e financeira deve ser analisada à luz dos valores envolvidos no processo do alto-forno. A figura 6 ilustra os resultados aqui citados.

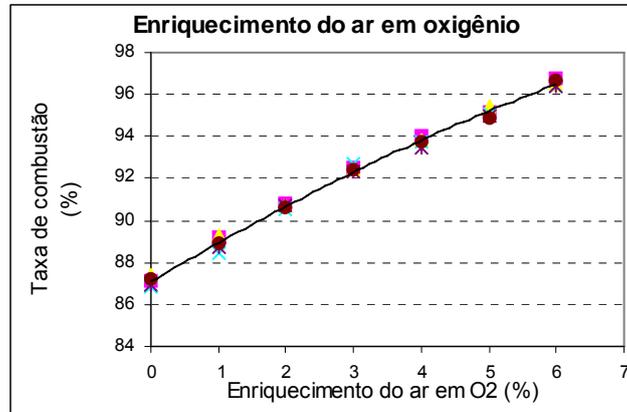


Figura 6 – Efeito do enriquecimento do ar em oxigênio sobre a taxa de combustão.

3.1.3 Efeito da umidade do carvão vegetal

Quanto à umidade do carvão vegetal, foi verificado que a sua elevação implica em valores maiores nas taxas de combustão. Foi observado que para teores de umidade maiores (em torno de 4,6%), houve maior dispersão nos resultados obtidos. A Figura 7 ilustra os resultados obtidos.

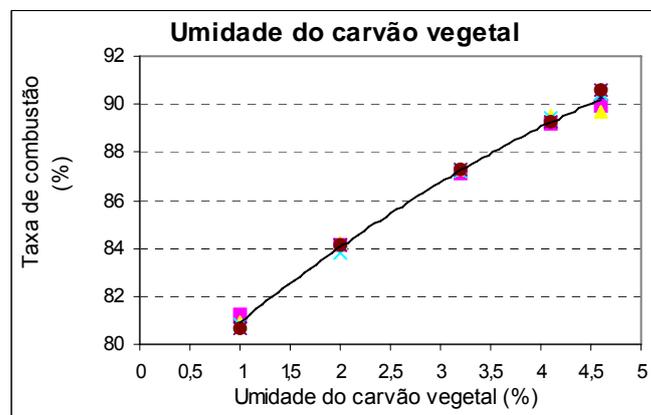


Figura 7 – Efeito da umidade do carvão vegetal sobre a taxa de combustão.

A explicação para o fato pode estar relacionada à “explosão” do carvão durante o processo de combustão, aumentando drasticamente a superfície específica do carvão, proporcionando sua maior combustão para teores de umidade maiores. É claro que o aumento da umidade do carvão vegetal pode ser útil para o sistema de moagem, pois exige menor consumo de energia e menor tempo na secagem, permitindo aumentos na produtividade do moinho. Todavia, não se pode esquecer do efeito negativo na temperatura de chama que decresce com a elevação do percentual de umidade do carvão pulverizado causada pela dissociação da água que consiste em uma reação endotérmica. Estes resultados despertaram a atenção da V&M do Brasil para investimentos no sistema de injeção de forma a melhorar o contato do ar soprado com o carvão pulverizado, permitindo uma melhor queima do mesmo na zona de combustão.⁽⁵⁾

3.1.4 Efeito do tamanho de grão do carvão vegetal

Para o estudo, as amostras foram preparadas variando a distribuição granulométrica do carvão vegetal. Desta forma, foi possível colocar as taxas de combustão em função do tamanho de grão. Observou-se um pequeno decréscimo da taxa de combustão com o aumento do tamanho de grão (Figura 8).

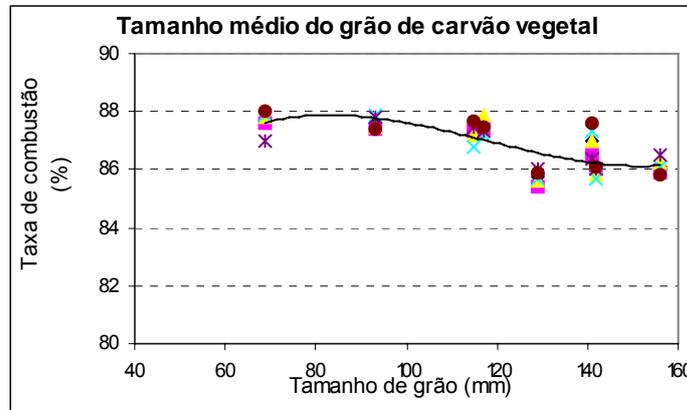


Figura 8 – Efeito do tamanho de grão sobre a taxa de combustão.

Todavia, os dados não são muito sensíveis às variações do tamanho de grão. Dir-se-ia que na faixa estudada (de até 200 μm), não houve variação sensível da taxa de combustão. A explicação para isto certamente está na estrutura do carvão vegetal que apresenta um elevado índice de vazios, favorecendo a sua combustão, independentemente do tamanho de grão. A Figura 8 ilustra estes resultados. Este fato não pode ser observado quando se ensaia carvão mineral.⁽⁶⁾ O efeito prático deste fato pode ser sentido diretamente na unidade moagem e secagem, pois admitindo-se um maior tamanho de grão, pode-se obter maior produtividade do moinho, sem afetar o comportamento deste novo carvão no alto-forno. Como a estrutura interna do carvão vegetal é muito mais porosa do que o carvão mineral, pode-se inferir que aumentos dos tamanhos de grão do carvão vegetal são mais do que factíveis de serem usados nos sistemas de injeção existentes.

3.1.5 Efeito da temperatura do forno

Quanto ao efeito da temperatura do forno, foram simuladas três temperaturas. Pode-se observar um pequeno aumento na taxa de combustão em função do aumento desta temperatura, conforme comprova a Figura 9. Ou seja, um aumento de 100°C implica no aumento de cerca de 0,4 % na taxa de combustão. A explicação para o fato consiste em se obter uma maior cinética em maiores temperaturas.

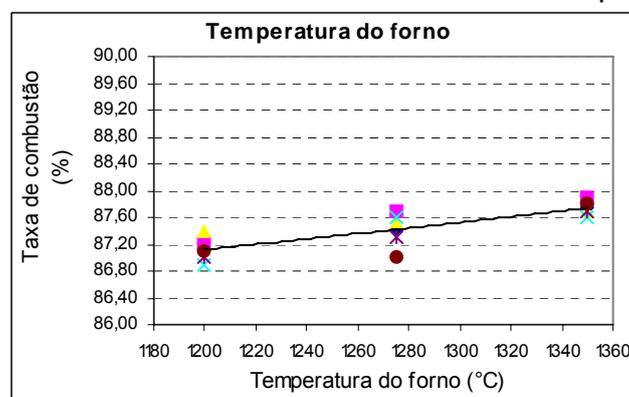


Figura 9 – Efeito da temperatura do forno sobre a taxa de combustão.

De posse dos resultados e considerando-se que a cinética de combustão é afetada positivamente com o aumento da temperatura, a elevação da temperatura de sopro e ou da temperatura de chama contribui para elevação da combustão do carvão vegetal. Deve ser ressaltado que a temperatura de chama deve ser a mais alta possível desde que não afete a permeabilidade do alto-forno.

3.1.6 Efeito do teor de carbono fixo

Também ficou evidente o efeito do teor de carbono fixo na combustão do carvão vegetal pulverizado. Nos ensaios realizados, mostrados na Figura 10, ficou claro que o aumento de cerca de 5% no teor de carbono fixo tem-se um aumento na taxa de combustão de cerca de 4,1%. Quando o teor de carbono se eleva acima de 60 %, o seu efeito é de diminuir esta variação, que cai para 3,7%. Explica-se esse fato devido a maior disponibilidade de carbono nos níveis de temperatura ensaiados.

Como a relação oxigênio-carbono foi mantida constante, então, havendo maior disponibilidade de carbono, certamente com menor teor de cinzas, observa-se um aumento na taxa de combustão.

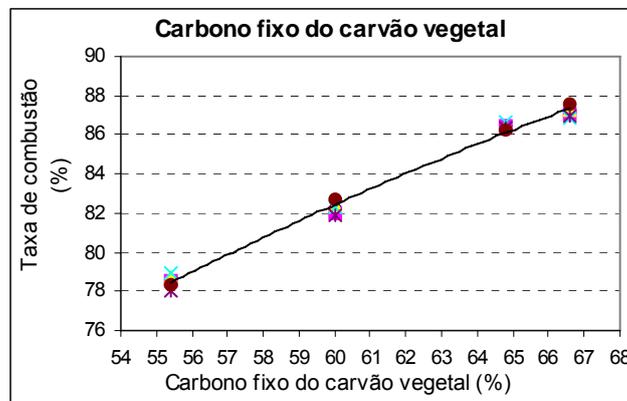


Figura 10 – Efeito do teor de carbono fixo sobre a taxa de combustão.

A questão de se usar um carvão vegetal de maior teor de carbono fixo certamente trará vantagens na sua combustão, pois a elevação do teor de carbono fixo representa redução no teor de cinzas considerando que as matérias voláteis não apresentam grandes variações para o carvão vegetal pulverizado.

3.2 Análise Estatística do Efeito Conjugado das Variáveis de Processo sobre a Taxa de Combustão do Carvão Vegetal Pulverizado

Com base nos resultados obtidos do efeito das variáveis de processo (taxa de injeção de carvão vegetal pulverizado, enriquecimento do ar com oxigênio, temperatura do forno, umidade do carvão, tamanho de grão e carbono fixo do carvão vegetal pulverizado), foi construída uma matriz de planejamento na qual variou-se o resultado da taxa de combustão correspondente a cada ensaio mantendo os valores das demais variáveis de processo ensaiadas fixos.

Com isso, foi possível realizar uma regressão linear múltipla entre todas as variáveis acima através da qual, avaliando e verificando as suposições do modelo obtido, tais como: análise de significância das variáveis, normalidade, independência e variância constante dos resíduos obtivemos a equação 2. Nesta equação não foram consideradas as variáveis Tamanho de Grão e Temperatura do Forno pois não apresentaram correlações significativas para as faixas de valores estudadas. A não

significância das variáveis pode ser explicada pelo baixo efeito destas variáveis na taxa de combustão.

$$TC = 43,454 - 0,107.TI + 1,667.EO_2 + 2,158.UCV + 0,817.CF \quad R^2 = 94,9\% \quad (2)$$

Onde:

- TC: taxa de combustão do carvão vegetal pulverizado;
- TI: taxa de injeção de carvão vegetal pulverizado;
- EO_2 : enriquecimento do ar com oxigênio;
- UCV: umidade do carvão vegetal pulverizado;
- CF: carbono fixo do carvão vegetal pulverizado;

Pela equação acima, conclui-se que o modelo de regressão linear múltipla entre as variáveis do processo e a taxa de combustão explica 94,9% da variação dos dados. Os gráficos e histogramas (Figura 11) de distribuição normal e variância constante dos resíduos abaixo mostram que o modelo obtido segue uma distribuição normal.

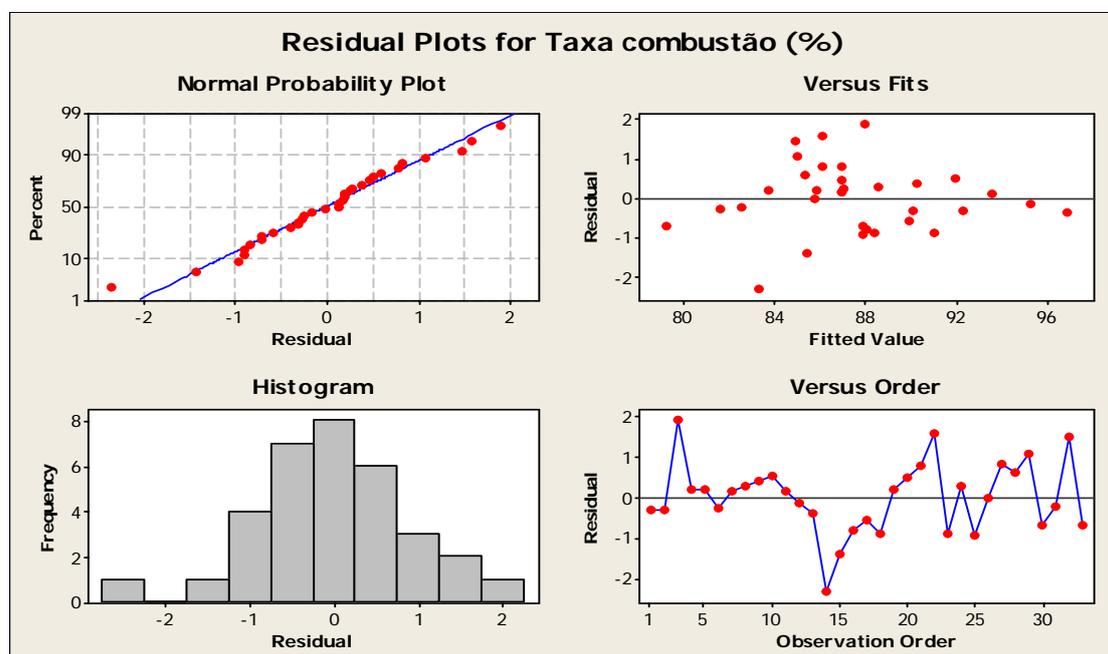


Figura 11 – Gráficos e histogramas de distribuição normal e variância constante dos resíduos.

4 CONCLUSÕES

- A elevação da taxa de injeção de carvão pulverizado de 100 kg por tonelada de gusa implica na redução da taxa de combustão de 10,7 %. Este efeito é mais pronunciado para maiores taxas de injeção.
- Um aumento de 6 % no enriquecimento do ar em oxigênio eleva em 9,5 % a taxa de combustão do carvão vegetal pulverizado. Também este efeito é diminuído para maiores enriquecimentos do ar em oxigênio.
- Estima-se que um aumento de 10,2 % na taxa de combustão pode ser obtido quando se eleva a umidade do carvão de 1 a 5 % (dados inferidos). Este efeito pode ser explicado pela “explosão” da partícula causada pela dissociação da água, melhorando o contato do combustível/comburente.
- A variação da taxa de combustão é pouco sensível a mudança do tamanho médio de grão do carvão vegetal (de 69 a 156 μ m).

- Aumentos na temperatura de chama implicam em aumento na taxa de combustão. Estima-se que um aumento de 100 °C na temperatura de chama eleve em 0,4 % na taxa de combustão do carvão vegetal (dados inferidos do aumento da temperatura do forno 2).
- O aumento no teor de carbono fixo induz a aumento na taxa de combustão. Para aumentos de 10 % no teor de carbono fixo, espera-se um aumento de 7,8 % na taxa de combustão. Este efeito é diminuído, quando se eleva o teor de carbono fixo, passando para valores da ordem de 4,4 %, para aumentos dos mesmos 10 % (dados inferidos dos dois últimos valores).
- Através de uma regressão linear múltipla foi obtida uma equação correlacionando as variáveis de processo que influenciam significativamente na taxa de combustão de carvão vegetal pulverizado e explica 94,9% da variação dos dados seguindo uma distribuição normal.

Agradecimentos

Os autores do trabalho agradecem à diretoria da V&M do Brasil, ao Dr. Ronaldo Santos Sampaio, IBB-Brasil, à fundação Gorceix e aos alunos de graduação da Escola de Minas que colaboraram estreitamente na realização dos ensaios no Laboratório de Siderurgia da UFOP.

REFERÊNCIAS

- 1 C. J. ATKINSON, R. R. WILLMERS. Blast Furnace Coal Injection Studies Using a Single Tuyere Raceway Investigation RIG. Fuel Processing Technology Congress, p. 107-115, Amsterdam, 1990.
- 2 ASSIS, P.S. Einblasen von Holzhohle in den Holzkohlehochofen. Dissertation. RWTH Aachen, Feb 1991, 124 S.
- 3 YUN-ZUI, G.; YUN-CAI, Le Injection de poudre dans le haut fourneau. Revue de Metallurgie- C.I.T. 78, p. 41-51.
- 4 BIRKAEUSER, L. Kohlenstaubleinblasen in den Hochofen: Die Verbrennungseigenschaften verschiedener Klohen und ihre Auswirkungen auf den Hochofen. Dissertation aus der RWTH. Jan 1990. 118 S.
- 5 OLIVEIRA, R.P. Elevação da Taxa de Injeção de Carvão Pulverizado nos Altos-Fornos da V&M do Brasil. In: SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES, 2007, Vitória. São Paulo: ABM, 2007.
- 6 KORTHAS, B. Untersuchungen der Verbrennungsvorgänge Hoher Kohlenstaubmengen unter Hochofennahen. Bedingungen und ihre Auswirkung auf die Hochfenstroemung. Dissertation RWTH Aachen, 1987, 136. S.