

PROPRIEDADES TERMOQUÍMICAS DOS FINOS DE CARVÃO VEGETAL E DE CARVÃO MINERAL, PARA A INJEÇÃO NAS VENTANEIRAS DE ALTOS-FORNOS SIDERÚRGICOS¹

Thermal and Chemical Properties of Vegetable and Mineral Coal Thins for Injection in Metallurgic Oven Aerators

Flávio Silva Machado² e Azarias Machado de Andrade³

Resumo: O objetivo desta pesquisa foi comparar as propriedades termoquímicas dos finos de carvão vegetal e de carvão mineral, para injeção nas ventaneiras de altos-fornos siderúrgicos. Os finos de carvão vegetal foram obtidos de duas fontes, sendo a primeira proveniente de madeira de *Eucalyptus* spp., carbonizada em um forno de alvenaria de superfície do Instituto de Florestas da UFRRJ, e a segunda de madeira de plantios puros de *Eucalyptus urophylla*, obtidos na carvoaria da Saint Gobain Canalização, na cidade de Seropédica-RJ. Os finos de carvão mineral (Optimum), importado da África do Sul, foram cedidos pela Companhia Siderúrgica Nacional, localizada em Volta Redonda-RJ. Foram avaliados os resultados das análises químicas imediata e elementar, bem como a composição das cinzas dos carvões, a basicidade binária das escórias e as eficiências de combustão dos carvões. Sob o ponto de vista químico, a qualidade dos finos de carvão vegetal equiparou-se ou, em alguns casos, superou a qualidade dos finos de carvão mineral. O teor de cinza do carvão mineral foi 963% superior aos teores de cinza dos carvões vegetais. O teor de carbono fixo do carvão mineral apresentou-se 35,54% abaixo do valor mínimo de 76,00%, recomendado pela Companhia Siderúrgica Nacional para injeção nas ventaneiras do alto-forno. O teor de enxofre na cinza do carvão mineral foi 26 vezes superior aos teores desse elemento nas cinzas dos carvões vegetais. Quando comparados com os finos do carvão mineral, os finos dos carvões vegetais apresentaram os maiores índices de K_2O e de Na_2O , devendo-se ressaltar que uma basicidade binária da escória de 1,84, cerca de duas vezes superior à recomendável para a operação em altos-fornos, foi apresentada pelos finos do carvão vegetal da Saint Gobain Canalização. Tendo por base os teores e a composição das cinzas, bem como as basicidades binárias das escórias, os finos do carvão vegetal da UFRRJ demonstraram ser os mais indicados para injeção nas ventaneiras de um alto-forno siderúrgico.

Palavras-chave: Carvão para siderurgia, cinza, escória, enxofre e basicidade binária.

Abstract: The objective of this research was to compare the thermal and chemical properties of vegetable and mineral coal thins for injection in metallurgic oven aerators. Vegetable coal thins were obtained from two sources: *Eucalyptus* spp, which was carbonized in a surface oven at the Forest Institute of the UFRRJ; and *Eucalyptus urophylla*, extracted from Saint Gobain Company coal-pit in Seropedica, RJ. Mineral coal thins (Optimum) imported from South Africa were donated by CSN, Volta Redonda, RJ. Immediate and elementary chemical analysis results were evaluated as well as the composition of

¹ Recebido para publicação em 5.7.2004 e aceito em 16.12.2004.

² Engenheiro Metalúrgico, M.S., Professor da Fundação CSN na Escola Técnica Pandiá Calógeras, Rua Professora Adelaide C. Franco, nº 10, Morada da Granja, 27335-210 Barra Mansa-RJ, <flavio1964@hotmail.com>. ³ Engenheiro Florestal, Ph.D. Professor Adjunto IV do DPF/IF/UFRRJ, Rua Albino Gomes da Silva, nº 4, 2º andar, Bairro Fazenda Caxias, 23890-000 Seropédica-RJ, <azarias@ufrj.br>.

coal ashes, slag binary basicity and coal combustion efficiencies. From a chemical viewpoint, vegetable coal thin quality was equivalent or, sometimes, superior to mineral coal thin quality. Mineral coal ash content was 963% superior compared to that of vegetable coal ash. Fixed carbon content in mineral coal was 35.54% below the minimum value of 76 percent, recommended by CSN for high-oven aerator injection. Sulfur content in mineral coal ash was 26 times superior compared with the contents of the same element in vegetable coal ashes. When compared with mineral coal thins, vegetable coal thins presented the largest indices of K_2O and Na_2O . Slag binary basicity around 1.84, double the recommended for high-oven operation, was verified in vegetable coal thins of Saint Gobain Company. Based on ash contents and composition as well as on slag binary basicity, UFRRJ vegetable coal thins were the most indicated for injection in metallurgic oven aerators.

Key words: Coal for metallurgy, ash, slag, sulfur, binary basicity.

1 INTRODUÇÃO

A siderurgia a carvão vegetal no Brasil incrementou-se a partir do século XIX. A abundância do minério de ferro e a floresta natural, nas proximidades das fábricas, permitiram o seu desenvolvimento. Porém, esse crescimento aconteceu muito tarde, somente três séculos depois do Descobrimento. Isto ocorreu devido ao fato de a Coroa Portuguesa não se interessar pelo desenvolvimento industrial de suas colônias, pois todo ferro necessário era comprado em outros países da Europa, principalmente da Inglaterra, que trocava os seus produtos industrializados pelo ouro do Brasil. Tal acontecimento explica o porquê do atraso da implantação da siderurgia no País. Posteriormente, com o apoio de D. João VI e José Bonifácio, foram realizadas contratações de técnicos alemães e franceses, como o Barão de Eschwege, Guilherme Feldner, Jean Monlevade e Henri Gorceix. Embrenharam-se por Minas Gerais, transportando máquinas e equipamentos em barcos, lombos de burros e arrastes. O objetivo era atender à agricultura incipiente e às mineradoras. A água, o minério e a floresta permitiam grandes progressos no setor. Já em 1853, Monlevade calculou existir, de Ouro Preto até Itabira, 85 fundições de ferro, com 150.000 arrobas de ferro produzidas. Em 1880, Gorceix calculou a existência de 110 forjas de ferro em Minas Gerais. Nessa

época, a siderurgia na Europa iniciava sua transformação, substituindo o carvão vegetal pelo carvão mineral. No Brasil, essa transformação só se iniciou em 1940, na cidade de Volta Redonda, no Estado do Rio de Janeiro, com a construção de uma siderúrgica de grande porte, utilizando o carvão mineral como agente redutor em seu alto-forno (Boas, 1966; Pounds, 1966; Wainer, 1975; Costa, 1978; Araújo, 1997; Nogueira et al., 2000).

O carvão vegetal foi o primeiro combustível utilizado em um alto-forno siderúrgico e o seu uso tem persistido em países onde algumas condições básicas são satisfeitas (Assis et al., 1982). O Brasil dispõe de fatores fundamentais para produção de energia derivada da biomassa vegetal, como clima favorável, grande extensão de terras com vocação florestal e um elevado potencial hídrico (Nunes, 1998). Como o Brasil é um país tropical, apresenta alto índice solarimétrico, o que permite alta produtividade de biomassa vegetal por unidade de área. Desta forma, o carvão vegetal representa uma excelente matéria-prima para a siderurgia brasileira, devido às suas qualidades como combustível e redutor, ao seu elevado grau de pureza e ao seu baixo custo de produção, quando comparado ao carvão mineral ou a outros elementos termorreductores.

Por causa de sua alta friabilidade, o carvão vegetal sofre uma considerável

degradação durante a sua produção e utilização, gerando uma grande quantidade de finos. Durante o manuseio do carvão, desde a produção até a sua entrada no alto forno, são gerados em torno de 25%, em peso, de finos abaixo de 10 mm de diâmetro (Oliveira, 1988). Diante da grande massa de carvão vegetal manuseada por uma indústria siderúrgica, essa elevada geração de finos ocasiona grande perda de material energético, pois eles, apesar de estarem abaixo da granulometria especificada para utilização no alto-forno, são ricos em carbono.

Grande parte dos finos, também denominados “moinha de carvão”, não é utilizada nos processos de redução, o que evidencia a importância de estudos que viabilizem o seu aproveitamento no processo siderúrgico, principalmente ao considerar os inúmeros produtores de pequeno e médio porte de ferro-gusa distribuídos pelo Brasil. Segundo a Abracave (2000), no Brasil existem 111 altos-fornos a carvão vegetal, que em 1999 produziram 7.399×10^3 t de ferro-gusa e, para esta produção, consumiram $20,15 \times 10^6$ mdc. Segundo Antunes (1982), existem várias opções para utilização dos finos de carvão vegetal no processo siderúrgico, como: sinterização, redução direta, injeção nas ventaneiras do alto-forno, queimadores de carvão pulverizado, mistura óleo-carvão, gaseificação em leito-fluidizado e pelotização de minério de ferro (hematita).

Dentre as alternativas tecnológicas para utilização dos finos de carvão vegetal, a que se apresenta como a mais viável é aquela que considera a sua injeção em alto-forno siderúrgico (Braga, 1999; Ribas, 1999; Castro, 1999). A técnica de injeção de finos permite uma economia na fabricação do ferro-gusa devido, principalmente, à redução do consumo de carvão bruto, ou seja, da quantidade de carvão que entra na usina (Braga, 1999; Jonsohn, 1999; Oliveira & Gushiken, 1999). Diante deste fato, um trabalho que comprove a boa qualidade termoquímica dos finos e estabeleça uma técnica simples e ecologicamente

correta para a sua utilização contribuirá para o melhor aproveitamento do carvão vegetal, gerando divisas para o País e novos postos de trabalho nas diversas etapas da produção e utilização desse combustível e redutor. A presente pesquisa objetivou a avaliação das propriedades termoquímicas dos finos de carvão vegetal, em comparação com os finos de carvão mineral, visando a sua injeção nas ventaneiras de altos-fornos siderúrgicos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Finos de carvão vegetal e de carvão mineral

Foram analisados os finos de carvões de três procedências, a saber:

1^a): carvão vegetal produzido da madeira de *Eucalyptus* spp., carbonizada em um forno de alvenaria de superfície do Departamento de Produtos Florestais da UFRRJ;

2^a): carvão vegetal da bateria de fornos da Saint Gobain Canalização, antiga Companhia Metalúrgica Barbará, derivado da madeira de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, proveniente de um povoamento florestal instalado na cidade de Seropédica-RJ; e

3^a): carvão mineral da Companhia Siderúrgica Nacional (“carvão Optimum”), importado da África do Sul.

Os finos do carvão mineral foram utilizados como referência, uma vez que, atualmente, são os mais utilizados para injeção nas ventaneiras dos altos-fornos siderúrgicos, com resultados reconhecidamente satisfatórios.

2.2 Análise química imediata dos finos de carvão

Para a análise química imediata dos finos dos carvões adotou-se a norma ASTM 1762-64, adaptada por Oliveira et al. (1982), determinando-se os teores de matérias voláteis, cinza e carbono fixo.

2.3 Análise química elementar dos finos de carvão e da cinza

A análise química elementar dos finos de carvão baseou-se na norma NBR 8290. A análise da composição da cinza foi realizada no Centro de Pesquisa da Companhia Siderúrgica Nacional, de acordo com os procedimentos adotados no seu Laboratório de Química Inorgânica e Orgânica, utilizando-se um espectrômetro de absorção atômica.

2.4 Basicidade binária das escórias

As basicidades binárias das escórias no alto-forno foram estimadas ao relacionar os teores médios de CaO e de SiO₂ dos carvões, considerando as respectivas massas moleculares.

2.5 Análise dos dados

Para a análise dos dados utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, com três tratamentos e oito repetições por tratamento. Os dados foram avaliados por intermédio da análise de variância e por comparações entre as médias através do teste de Tukey. Foi adotado o nível de 1% de significância.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise química imediata dos carvões

No Quadro 1 estão os teores médios de matérias voláteis, de cinza e de carbono fixo dos carvões, obtidos a partir da sua análise química imediata.

Os valores médios apresentados no Quadro 1, resultantes da análise química imediata dos carvões, de acordo com Silva (1997), indicam que as propriedades químicas dos carvões vegetais ora avaliados, considerando o processo de injeção nas ventaneiras

dos altos-fornos siderúrgicos, são melhores do que aquelas apresentadas pelo carvão mineral importado. Quando são consideradas, por exemplo, as propriedades estabelecidas para o carvão de injeção nas ventaneiras dos altos-fornos da Companhia Siderúrgica Nacional, percebe-se que todos os valores médios relacionados aos carvões vegetais apresentaram-se dentro de intervalos considerados aceitáveis pelo alto-forno. Entretanto, no caso do carvão mineral, o valor médio do teor de carbono fixo (56,1%) apresentou-se cerca de 35,5% abaixo do valor mínimo recomendável (76%).

Embora os carvões vegetais, quando foram comparados com o carvão mineral, tenham apresentado os menores teores médios de matérias voláteis, do ponto de vista estatístico todos os valores encontram-se dentro do intervalo aceitável estabelecido pela Companhia Siderúrgica Nacional, compreendido entre 17 e 35% (Silva, 1997). O teor médio de cinza do carvão mineral (10,6%) foi cerca de dez vezes superior aos teores médios de cinza apresentados pelos carvões vegetais (1,00%). Como existe uma correlação positiva entre o teor de cinza do carvão e o volume de escórias, supõe-se que elevados teores de cinza representem um fator negativo para a

Quadro 1 – Teores médios de matérias voláteis, de cinza e de carbono fixo, com base na análise química imediata dos carvões

Table 1 – Mean contents of volatile matters, ash and fixed carbon, based on immediate chemical analysis of coals

Procedência do Carvão	Matérias Voláteis	Cinza	Carbono Fixo
	(%)		
UFRRJ	18,80 ^b	1,00 ^b	80,20 ^a
Saint-Gobain Canalização	16,26 ^b	1,00 ^b	82,74 ^a
CSN	33,30 ^a	10,63 ^a	56,07 ^b

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si a 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

injeção dos finos de carvão mineral nas ventaneiras dos altos-fornos siderúrgicos. Portanto, ao considerar especificamente os teores de cinza e de carbono fixo, para injeção nas ventaneiras de altos-fornos siderúrgicos, os carvões vegetais ora analisados mostraram-se significativamente superiores ao carvão mineral importado.

3.2 Análise química inorgânica das cinzas dos carvões

No Quadro 2 estão os valores médios obtidos a partir da análise dos principais componentes das cinzas dos carvões.

Os valores médios observados no Quadro 2 indicam que os carvões vegetais diferenciaram-se pouco entre si. Somente os teores de sílica e de sódio (SiO_2 e Na_2O , respectivamente) apresentaram-se significativamente superiores no caso do carvão vegetal procedente da UFRRJ. Considerando que o local da instalação do forno de carvoejamento da UFRRJ é bastante arenoso, tais resultados podem evidenciar uma possível contaminação do carvão vegetal no decorrer do descarregamento do forno e, ou, do seu ensacamento. Quando também é considerado o carvão mineral, são observados valores médios estatisticamente superiores para os teores de sílica, alumínio, cálcio e enxofre, em relação aos carvões vegetais. Destaque especial deve ser dado ao teor médio de enxofre (0,7%) do carvão mineral, que foi cerca de 26 vezes

superior aos teores médios do mesmo elemento nos carvões vegetais. É sabido que teores elevados de enxofre, por ocasião da utilização dos carvões nos altos-fornos siderúrgicos, são altamente prejudiciais ao ambiente, devido à liberação de grandes quantidades de SO_2 para a atmosfera. Uma das alternativas para o uso desse tipo de carvão seria a instalação de equipamentos de dessulfuração, o que resultaria em gastos da ordem de 100 milhões de dólares, considerando usinas de pequeno e médio porte. Mesmo assim, haveria a geração de grandes volumes de ácido sulfúrico e de pó de enxofre, produtos de baixa aceitação no mercado e de estocagem altamente perigosa (Carvalho & Muniz, 1996).

Deve-se atentar para a composição das cinzas dos carvões, uma vez que Oliveira et al. (1982) relataram que ela pode interferir no comportamento do alto-forno e sobre a oxidação do carbono. Os metais alcalinos, ao assumirem o papel de catalisadores das reações no interior do alto-forno, aceleram o processo de oxidação e provocam um considerável aumento no consumo de termorreduzidor. Nas regiões do alto-forno em que as temperaturas mantiverem-se relativamente baixas (700 a 800 °C), haverá a geração de grandes quantidades de monóxido de carbono, que não serão utilizadas no processo de redução do minério de ferro (hematita).

Os carvões com elevados teores de sílica (SiO_2), como o carvão mineral ora analisado

Quadro 2 – Valores médios observados a partir da análise dos principais componentes das cinzas dos carvões

Table 2 – Mean values observed after analysis of coal ash main components

Procedência do Carvão	SiO_2	Al_2O_3	CaO	K_2O	Na_2O	MgO	S
	(%)						
UFRRJ	0,728 ^b	0,124 ^b	0,333 ^b	0,150 ^a	1,159 ^a	0,066 ^a	0,026 ^b
Saint-Gobain	0,190 ^c	0,125 ^b	0,328 ^b	0,156 ^a	0,508 ^b	0,070 ^a	0,028 ^b
CSN	2,497 ^a	2,099 ^a	0,567 ^a	0,044 ^b	0,021 ^c	0,123 ^a	0,700 ^a

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si a 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

e, em menor escala, o carvão vegetal procedente da UFRRJ, podem resultar em um acréscimo significativo de fundentes no alto-forno, o que, por sua vez, elevaria o volume de escória no decorrer do processo de termorredução. Oliveira et al. (1982) ressaltaram que concentrações elevadas de álcalis, como o Na_2O e o K_2O , devem ser evitadas, uma vez que podem ocasionar problemas operacionais no alto-forno. A formação de partículas, que impregnam os refratários (“cascões”), poderá interferir na descida da carga e aumentar o consumo de termorreduzidor, devido à perda de calor. Neste caso, dentre os carvões ora analisados, deve-se atentar para os maiores índices de K_2O e de Na_2O dos carvões vegetais, quando comparados com o carvão mineral. Atenção especial deve ser direcionada ao carvão vegetal procedente da UFRRJ, que apresentou um teor médio de Na_2O significativamente superior aos dos demais carvões avaliados.

No Quadro 3 estão os valores médios das basicidades binárias das escórias no alto-forno, estimados a partir da relação entre os teores médios de CaO e de SiO_2 , considerando as respectivas massas moleculares.

O carvão vegetal procedente da Saint Gobain Canalização foi aquele que resultou na maior basicidade binária da escória (1,84), 275,5 e 666,7% superior às basicidades binárias resultantes do carvão vegetal da UFRRJ (0,49) e do carvão mineral da CSN (0,24), respectivamente. Segundo Assis (1998), existe uma correlação positiva entre a basicidade binária e a concentração de álcalis no interior do alto-forno siderúrgico. Há também evidências de que, para uma boa eficiência termorreduzidora, o alto-forno deve operar com basicidades binárias abaixo de 0,90. Assim sendo, ao considerar apenas a basicidade binária, pode-se inferir que somente o carvão vegetal da Saint Gobain Canalização apresentou valor médio acima do recomendável. Este fato ocorreu em virtude da associação do alto teor médio de

CaO (0,33%) e do baixo teor médio de SiO_2 (0,2%) apresentados pelo carvão vegetal da Saint Gobain Canalização, o que resultou na elevada basicidade binária da escória. Entretanto, tais características podem ser alteradas, desde que as causas dos altos teores médios de CaO no carvão vegetal sejam identificadas. Uma das possíveis causas, de acordo com resultados obtidos por Andrade (1993), pode ser a correção da acidez dos solos por meio da aplicação de quantidades excessivas de calcário calcítico ou de outros corretivos ricos em cálcio. Neste caso, o cálcio presente no solo será capturado pelo sistema radicular das árvores e comporá estruturas químicas inter e intracelulares, como os pectatos e os oxalatos de cálcio, que, por sua vez, serão acusados na composição do carvão vegetal.

Há de se ressaltar que, no caso em questão, a menor basicidade binária da escória apresentada pelo carvão vegetal da UFRRJ deveu-se ao seu elevado teor de sílica (SiO_2). Esta, evidentemente, não é a melhor forma de controlar a basicidade binária da escória, pois, conforme mencionado anteriormente, elevados teores de sílica também resultam em considerável aumento do volume de escória no bojo do alto-forno siderúrgico. Todavia, deve-se destacar que o aumento do

Quadro 3 – Basicidade binária das escórias no alto-forno, estimada pela relação dos teores médios de CaO e de SiO_2 , considerando as respectivas massas moleculares

Table 3 - Binary basicity of high-oven slag, estimated by the relation between CaO and SiO_2 mean contents, considering their respective molecular masses

Procedência do Carvão	Basicidade Binária da Escória
UFRRJ	0,49 ^b
Saint-Gobain Canalização	1,84 ^a
CSN	0,24 ^c

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si a 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

volume de escória no alto-forno siderúrgico, indiretamente, contribui para a diminuição do caráter ácido do minério de ferro brasileiro (hematita). Desta forma, ao considerar, simultaneamente, os teores e a composição das cinzas, bem como as basicidades binárias das escórias, pode-se afirmar que o carvão vegetal procedente da UFRRJ apresenta as melhores propriedades para ser injetado nas ventaneiras de um alto-forno siderúrgico.

3.3 Análise química elementar dos carvões

No Quadro 4 estão os valores médios observados após a análise química elementar dos carvões. No mesmo quadro também estão apresentados os valores médios dos teores de umidade e dos poderes caloríficos superiores dos carvões ora avaliados.

Por questões metodológicas, os teores de carbono dos carvões foram superestimados na análise química elementar, quando comparados com os mesmos valores obtidos da análise química imediata (Quadro 1). Este fato ocorreu porque, no caso da análise química elementar, o carbono livre, ou seja, aquele desvinculado da estrutura carbonosa fixa e que fará parte da composição das matérias voláteis (gases volatilizáveis), também foi considerado. Desta forma, em média, os teores de carbono foram acrescidos em 4,1, 7,6 e 28,2%, para os carvões da UFRRJ, da

Saint Gobain Canalização e da Companhia Siderúrgica Nacional, respectivamente. Por conseguinte, os respectivos valores médios dos teores de matérias voláteis nos carvões, apresentados no Quadro 1, deveriam corresponder, aproximadamente, ao somatório dos percentuais de carbono livre, de hidrogênio, de oxigênio e de nitrogênio, o que, embora tenha ocorrido no caso dos carvões vegetais, não ocorreu para o carvão mineral, talvez em virtude da necessidade de ajustes nas normas adotadas, que foram adaptadas para a análise de carvão vegetal.

É válido o argumento de que o teor de carbono fixado no carvão, para fins siderúrgicos, deva ser o maior possível para a otimização do processo de termorredução no alto-forno. Porém, na prática, o efetivo controle do processo de concentração de carbono é bastante difícil, sendo dependente de muitos fatores, como: propriedades da madeira, temperatura máxima no leito de carbonização, condições ambientais, tipo do forno, dentre outros. Entretanto, também deve ser ressaltada a importância da presença de adequados teores de matérias voláteis nos carvões, visando-se a expulsão dos gases e dos sólidos em suspensão no interior do alto-forno siderúrgico. Para Oliveira et al. (1982), percentuais predeterminados de carbono nos carvões podem ser obtidos nos equipamentos com aquecimento externo, com a translocação dos gases não-oxidantes através da carga.

Quadro 4 – Valores médios da análise química elementar, dos teores de umidade e dos poderes caloríficos superiores dos carvões

Table 4 – Elementary chemical analysis mean values of humidity contents and superior calorific power of coals

Procedência do Carvão	Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio	Umidade	PCS
	(%)					(kcal kg ⁻¹)
UFRRJ	83,52 ^a	2,12 ^b	11,93 ^a	1,43 ^a	8,4 ^a	8.825,46 ^a
Saint-Gobain	89,05 ^a	2,53 ^b	5,74 ^b	1,68 ^a	5,3 ^b	9.690,81 ^a
CSN	71,91 ^b	4,20 ^a	11,36 ^a	1,11 ^a	7,8 ^a	6.663,80 ^b

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si a 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Embora Assis (1998) recomende que os teores de umidade dos carvões, para fins siderúrgicos, não devam extrapolar 4%, todos os valores médios superaram o referido patamar. Parece que, por questões relacionadas ao armazenamento e ao pronto encaminhamento para a usina siderúrgica, o carvão vegetal da Saint Gobain Canalização apresentou o menor teor médio de umidade. Também é provável que, em virtude dos mesmos fatores, os carvões da UFRRJ e da Companhia Siderúrgica Nacional tenham apresentado as maiores taxas de umidade, estatisticamente iguais entre si. Há de se ressaltar que, naturalmente, ocorrerão equilíbrios relativos das umidades dos carvões em função da umidade do ambiente em que se encontram. Embora todos os carvões analisados tenham apresentado teores de umidade acima dos adequados para a termorredução nos altos-fornos siderúrgicos, tal fato não constitui contra-indicação dos mesmos. Para que sejam evitados os contratempos comuns ao uso de carvões com altos teores de umidade, como o entupimento de tubulações e o abaixamento da temperatura da chama do alto-forno, os mesmos podem ser submetidos a uma pré-secagem na própria usina, o que, evidentemente, resultaria no aumento do custo de produção do termorredutor.

Os comportamentos dos poderes caloríficos superiores corresponderam àqueles apresentados pelos teores de carbono fixo dos respectivos finos dos carvões (Quadro 1). Portanto, foi observada a existência de correlação positiva entre os poderes caloríficos dos finos dos carvões com os seus respectivos teores de carbono, ou seja, quanto maior o teor de carbono no carvão, maior o seu poder calorífico. Todavia, maiores poderes caloríficos foram apresentados pelos finos dos carvões vegetais, quando eles foram comparados com os finos do carvão mineral Optimum, importado da África do Sul. Considerando que os poderes caloríficos superiores dos carvões vegetais foram estatisticamente iguais entre si, e que Mendes et al. (1982)

correlacionaram o poder calorífico do carvão vegetal com a temperatura de carbonização, pode-se inferir que para sua obtenção foram utilizadas temperaturas máximas de carbonização bastante próximas.

Desta forma, com base na análise química inorgânica, observou-se que os resultados obtidos com os finos dos carvões vegetais superaram aqueles inerentes aos finos do carvão mineral, quando foram consideradas as respectivas propriedades térmicas e de redução.

3.4 Eficiência de combustão dos finos de carvão

No Quadro 5 estão os valores percentuais médios da eficiência de combustão dos finos dos carvões vegetais da UFRRJ e da Saint Gobain Canalização, bem como do carvão mineral da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN).

De acordo com os valores médios apresentados no Quadro 5, não ocorreram diferenças estatísticas significativas entre as eficiências de combustão dos finos dos carvões. Segundo Sausmikat (1994), elevados teores de matérias voláteis e de carbono fixo favorecem a eficiência de combustão dos

Quadro 5 – Valores médios da eficiência de combustão (%) dos carvões vegetais da UFRRJ e da Saint Gobain Canalização e do carvão mineral da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN)

Table 5 – Mean values of combustion efficiency (%) of UFRRJ and Saint Gobain vegetable coals and National Metallurgical Company (CSN) mineral coal

Procedência do Carvão	Eficiência de Combustão (%)
UFRRJ	75,87 ^a
Saint-Gobain Canalização	65,62 ^a
CSN	64,58 ^a

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si a 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

carvões. Elevados teores de cinza, por sua vez, interferem negativamente na eficiência de combustão. Consta-se que houve balanceamento entre os valores finais das eficiências de combustão dos carvões analisados.

Embora o carvão mineral tenha apresentado o maior teor de matérias voláteis, também apresentou o maior teor de cinza e o menor teor de carbono (Quadro 1). Isto, por sua vez, fez com que sua eficiência de combustão, que ora é incrementada e ora reduzida, fosse mantida no mesmo nível daqueles observados nos carvões vegetais, ou seja, os menores teores de cinza e os maiores teores de carbono dos carvões vegetais possibilitaram a igualdade estatística dos valores das eficiências de combustão destes e do carvão mineral. Houve, portanto, balanceamento entre os valores finais das eficiências de combustão, não sendo possível a detecção de diferenças significativas entre eles.

4 CONCLUSÕES

Com base nas discussões dos resultados observados no decorrer da pesquisa, pôde-se chegar às seguintes conclusões:

1^a) Os valores médios observados após a análise química imediata dos finos dos carvões vegetais da UFRRJ e da Saint Gobain Canalização apresentam-se dentro dos intervalos aceitáveis pela Companhia Siderúrgica Nacional, que utiliza os finos de carvão mineral para injeção nas ventaneiras do altoforno.

2^a) Para ser injetado nas ventaneiras dos altos-fornos siderúrgicos, a qualidade química dos finos de carvão vegetal equiparou-se ou, em alguns casos, superou a qualidade dos finos de carvão mineral.

3^a) O teor de cinza do carvão mineral é superior ao teor de cinza apresentado pelo carvão vegetal. No presente estudo, o teor de cinza do carvão mineral apresentou-se dez vezes superior aos teores de cinza apresentados pelos carvões vegetais analisados.

4^a) O teor de carbono fixo do carvão mineral Optimum, importado da África do Sul, apresentou-se 35,5% abaixo do valor mínimo recomendável pela Companhia Siderúrgica Nacional para injeção nas ventaneiras do alto-forno (76%).

5^a) A análise química das cinzas dos carvões demonstrou que o carvão mineral apresenta teores de sílica, alumínio, cálcio e enxofre superiores àqueles apresentados pelos carvões vegetais. Na presente pesquisa, o teor de enxofre na cinza do carvão mineral foi 26 vezes superior aos teores desse elemento nas cinzas dos carvões vegetais, o que é altamente prejudicial para o ambiente, em virtude da liberação de grandes quantidades de SO_2 para a atmosfera.

6^a) Os finos dos carvões vegetais apresentam maiores índices de K_2O e de Na_2O , quando comparados com os finos de carvão mineral importado. Isto pode refletir negativamente na produtividade do alto-forno siderúrgico, devido ao possível comprometimento da descida da carga e ao aumento do consumo de termorredutor.

7^a) Os finos do carvão vegetal da Saint Gobain Canalização apresentam basicidade binária da escória cerca de duas vezes superior à recomendável para a operação de altos-fornos siderúrgicos (0,9).

8^a) Ao considerar, simultaneamente, os teores e a composição das cinzas, bem como as basicidades binárias das escórias, o carvão vegetal da UFRRJ demonstrou ser o mais indicado para injeção nas ventaneiras de um alto-forno siderúrgico.

9^a) No presente estudo, os finos dos carvões vegetais apresentaram maiores teores de carbono elementar e poderes caloríficos superiores, quando foram comparados com os finos do carvão mineral. Desta forma, há evidências de que as propriedades térmicas e de redução dos finos de carvão vegetal sejam superiores àquelas apresentadas pelos finos de carvão mineral.

10^a) Os carvões vegetais da UFRRJ e da Saint Gobain Canalização apresentaram teores médios de finos de 21,2 e 19%, respectivamente. Segundo o mesmo critério de classificação granulométrica, o carvão mineral importado apresentou teor de finos próximo de 100%, o que implica a necessidade da sua coqueificação.

11^a) Não ocorrem diferenças significativas entre as eficiências de combustão dos finos de carvão mineral e de carvão vegetal, o que indica a possibilidade da utilização dos finos de carvão vegetal nos altos-fornos siderúrgicos, sem prejuízo ao seu desempenho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – ABRACAVE. **Anuários Estatísticos**. Disponível em <http://www.abracave.com.br/index_anuario.html>. Acesso em: 2000.

ANDRADE, A. M. **Efeitos da fertilização mineral e da calagem na produção e na qualidade da madeira e do carvão de eucalipto**. 1993. 105 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Viçosa, MG – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1993.

ANTUNES, R. C. **Briquetagem de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC - Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982. p. 199-206. (publicação técnica)

ARAÚJO, L. A. **Manual de Siderurgia**. São Paulo: Arte e Ciência, 1997. p. 5-14.

ASSIS, P. S. **Injeção de materiais pulverizados em altos-fornos**. Volta Redonda: UFF - Universidade Federal Fluminense, 1998. p. 4-15.

ASSIS, P. S.; MARINHO, L. Z. A.; PORTO, F. M. **Utilização do carvão vegetal na siderurgia**. Belo Horizonte: CETEC - Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982. p. 286-288. (publicação técnica)

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standard method for chemical analyses of wood charcoal**. Philadelphia, 1977. 1042 p.

BOAS, E. A. **A indústria siderúrgica na América Latina**. São Paulo: IPSIS, 1996. p. 31-43.

BRAGA, R. N. B. **Aspectos tecnológicos referentes a injeção de materiais pulverizados em altos-fornos**. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Divisão de Redução de Matérias-Primas Siderúrgicas. 1999. p. 17-43.

CARVALHO, J. F.; MUNIZ, B. H. Redução de minérios - uma constante consolidação do estudo de novos processos. **Revista Metalúrgica**, v. 47, p. 515-516, 1996.

CASTRO, L. F. A. Aspectos termodinâmicos e cinéticos da injeção de carvão e outros materiais no alto-forno. **Revista Metalúrgica**, v. 54, p. 45-93, 1999.

COSTA, A. **Volta Redonda – Ontem e hoje**. Volta Redonda: Lux, 1978. p. 42-59.

JONSOHN, K. **Injeção de materiais pulverizados em altos fornos**. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Metalurgia e Matérias, Divisão de Redução de Matérias-Primas Siderúrgicas, 1999. p. 185-205.

MENDES, A. P. C. S.; CHIAPPETTI, A. A.; REZENDE, L. F. M. Reator de Carbonização de madeira. In: PENEDO, W. R. **Carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC - Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982. p. 159-164. (publicação técnica)

NOGUEIRA, L. A. H. et al. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Brasília: 2000. 144 p.

NUNES, W. H. **Utilização do estipe de *Euterpe edulis* Martius para a produção de carvão, de celulose e de chapa de partículas**. 1998. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 1998.

OLIVEIRA, E. **Correlação entre parâmetros de qualidade da madeira e do carvão de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden**. 1988. 47 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1988.

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Propriedades do carvão vegetal. In: PENEDO, W. R. **Carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC - Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982. p. 9-61.

OLIVEIRA, J. C.; GUSHIKEN, J. L. **Injeção de materiais pulverizados em altos fornos**. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Divisão de Redução de Matérias-Primas Siderúrgicas. 1999. p. 207-240,

POUNDS, N. J. G. **Geografia do ferro e do aço**. Rio de Janeiro: Zahar, 1966. p. 7-12.

RIBAS, M. A.; OSÓRIO, E.; VILELA, A. C. F. **Comportamento dos carvões injetados no alto forno**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Divisão de Redução de Matérias-Primas Siderúrgicas. 1999. p. 513-516.

SAUSMIKAT, E. Pulverized-coal injection into no. 1 blast furnace at Oita Works. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 10, n. 3, p. 98-103, 1994.

SILVA, M. A. T. **Influência das propriedades físicas e químicas dos carvões sobre as suas friabilidades**. Volta Redonda: Contribuição Técnica à I Semana Tecnológica da CSN - Companhia Siderúrgica Nacional, 1997. não paginado

WAINER, E. **Siderurgia brasileira a carvão vegetal**. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1975. p. 10-26.