

COMPARAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS FINOS DE CARVÃO VEGETAL E DE CARVÃO MINERAL, PARA INJEÇÃO NAS VENTANEIRAS DE ALTOS-FORNOS SIDERÚRGICOS¹

Comparison Between the Physical and Mechanical Properties of Vegetable and Mineral Coal Thins for Injection in Aerators of Metallurgical Ovens

Azarias Machado de Andrade² e Flávio Silva Machado³

Resumo: O objetivo deste trabalho foi comparar os 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: 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*, obtida na carvoaria da Saint Gobain Canalização, na cidade de Seropédica-RJ. Os finos de carvão mineral (Optimum), importados da África do Sul, foram cedidos pela Companhia Siderúrgica Nacional, localizada em Volta Redonda-RJ. Foram avaliadas a granulometria, a moabilidade, a porosidade e as densidades do granel, aparente e verdadeira dos carvões. Os finos dos carvões vegetais apresentaram porosidade e grau de moabilidade superiores e densidades do granel e aparente estatisticamente inferiores aos do carvão mineral. Com base no grau de moabilidade, os finos de carvão vegetal, principalmente os da UFRRJ, demonstraram ser os mais indicados para injeção nas ventaneiras de um alto-forno siderúrgico.

Palavras-chave: Carvão para siderurgia, moabilidade, porosidade e densidade.

Abstract: The objective of this research was to compare vegetable and mineral coal thins for injection in aerators of metallurgical ovens. Vegetable coal thins were obtained from two sources: *Eucalyptus* spp. wood carbonized in a surface oven at the Institute of Forests of UFRRJ; and *Eucalyptus urophylla* wood extracted from Saint Gobain Company, Seropédica, RJ. The mineral coal thins (Optimum) imported from South Africa were donated by CSN, Volta Redonda, RJ. Particle dimensions, grindability, porosity, and apparent and true densities of the coal were evaluated. The vegetable coal thins presented superior porosity and grindability rates, and bulk and apparent densities statistically inferior to those presented by mineral coal thins. Based on the grindability degrees found, vegetable coal thins, mainly those of UFRRJ, were the most indicated for injection in the aerators of a metallurgical oven.

Key words: Coal for metallurgy, grindability, porosity, and density.

¹ Recebido para publicação em 27.5.2004 e aceito em 28.8.2004.

² Engenheiro Florestal, D.S., 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>. ³ Engenheiro Metalúrgico, Professor, M.S. 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>.

1 INTRODUÇÃO

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 & Marinho, 1982; Assis, 1998; Castro, 1999; Ribas et al., 1999; Jonsohn, 1999). 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 elevado potencial hídrico (Nunes, 1998; INFOTEC/PRO-CARVÃO, 2000). Por ser o Brasil um país tropical, apresenta alto índice solarimétrico, o que permite uma 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 termorreduzidores (INFOTEC/ PRO-CARVÃO, 2000, 2001; Nogueira et al., 2000).

Por causa da sua alta friabilidade, o carvão vegetal sofre uma considerável degradação durante a sua produção e utilização, gerando 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 uma considerável perda de material energético, pois, apesar de estarem abaixo da granulometria especificada para utilização no alto-forno, são ricos em carbono. Grande parte dos finos, também denominados “moinha”, não é utilizada nos processos de redução, o que evidencia a importância de um estudo que viabilize o seu aproveitamento no processo siderúrgico, principalmente quando são considerados os inúmeros produtores de pequeno e médio porte de ferro-gusa distribuídos pelo

Brasil. Segundo a ABRACAVE (2000), existem no País 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.

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 (Carvalho & Muniz, 1996; Assis, 1998; Castro, 1999; Braga, 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. Diante deste fato, um trabalho que comprove a importância da utilização 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 (Jonsohn, 1999; Ribas et al., 1999; INFOTEC/PRO-CARVÃO, 2000; Nogueira et al., 2000; INFOTEC/PRO-CARVÃO, 2001). Dentro deste contexto, objetivou-se, com este trabalho, a avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos finos de carvão vegetal, em comparação aos 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:

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

2ª) 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.

3ª) 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 Ensaios de tamboramento e granulométricos dos carvões

Os ensaios de tamboramento dos carvões foram efetuados com base na norma NBR 8996. Os carvões foram peneirados e classificados por faixas granulométricas, antes e após os ensaios propriamente ditos, tendo sido utilizados, em média, 14,50 kg de carvão em cada teste.

As estimativas das granulometrias médias dos carvões foram realizadas no Laboratório de Mineralogia da Universidade Federal Fluminense, na cidade de Volta Redonda-RJ. Utilizou-se o equipamento conhecido por Rotapy, adotando-se o tempo de vibração de 10 minutos e amostras de 500 g de carvão. Foi utilizado um conjunto de peneiras disponíveis no Laboratório de Mineralogia da Universidade Federal Fluminense, com as seguintes aberturas, em milímetros: 15,90; 12,50; 9,52; 6,35; 4,76; 4,00; 2,36; e 1,00.

Para efeito de comparação, adotou-se o critério de classificação granulométrica

utilizado pela Saint Gobain Canalização, que considera como “finos” os carvões com granulometria abaixo de 7,0 mm.

2.3 Moabilidade dos carvões

Para efetivação dos ensaios de moabilidade dos carvões adotou-se a norma NBR 8739 (*Hardgrove Grindability Index*). Após o teste de moabilidade propriamente dito, foram efetuadas as pesagens das amostras de carvão que passavam por uma tela com malha de 0,075 mm. Conhecida a massa de carvão passante, foram estimados os graus de moabilidade dos carvões.

2.4 Densidades dos carvões

2.4.1 Densidade do granel (kg mdc⁻¹)

Para determinar as densidades do granel dos carvões (kg mdc⁻¹), adotou-se a norma NBR 8630. As densidades foram estimadas pela fórmula:

$$D_{(kg/mdc)} = [M_{(kg)} - M'_{(kg)}] / V(m^3)$$

em que D = densidade do granel do carvão_(kg/mdc); M = massa do carvão_(kg) + massa do recipiente_(kg); M' = massa do recipiente vazio_(kg); e V = volume do recipiente (m³).

2.4.2 Densidade aparente (g cm⁻³)

As densidades aparentes dos finos dos carvões (g cm⁻³) foram determinadas com base na norma NBR 8479, utilizando-se amostras com a granulometria média de 0,075 mm.

2.4.3 Densidade verdadeira (g cm⁻³)

As densidades verdadeiras dos finos dos carvões foram determinadas com base na norma ASTM-D-167-73, utilizando-se amostras com a granulometria média de 0,075 mm. A determinação das densidades verdadeiras dos finos de carvão foram efetuadas a partir da fórmula:

$$D_v = P_{cs}/P_{cs} - (P' - P'')$$

em que D_v = densidade relativa verdadeira do carvão (g cm^{-3}); P_{cs} = peso da amostra de carvão absolutamente seca (g); P' = peso do picnômetro + água + amostra de carvão (g); e P'' = peso do picnômetro + água (g).

2.5 Porosidade dos carvões

As porosidades dos finos dos carvões foram estimadas pela fórmula:

$$\text{Porosidade}_{(\%)} = 100 - 100 \times [D_a (\text{g cm}^{-3}) / D_v (\text{g cm}^{-3})]$$

em que D_a = densidade aparente dos finos de carvão, em g cm^{-3} ; e D_v = densidade verdadeira dos finos de carvão, em g cm^{-3} .

2.6 Análise dos dados

Para 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 significância de 1%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaios granulométricos dos carvões

Com base no critério de classificação granulométrica da Saint Gobain Canalização, que considera como “finos” os carvões com granulometria abaixo de 7,0 mm, foram efetuados os ensaios de tamboramento dos carvões vegetais, obtendo-se os valores médios de finos de 21,2 e de 19,0%, para os carvões da UFRRJ e da Saint Gobain Canalização, respectivamente. Para os mesmos carvões, foram observadas granulometrias médias ponderadas de 13,2 e de 15,6 mm, respectivamente.

Os ensaios não foram efetuados em relação ao carvão mineral, uma vez que esse procedimento não faz parte das rotinas de análise das usinas siderúrgicas a carvão mineral. Entretanto, é sabido que, ao ser descarregado nos silos de estocagem das indústrias, o carvão mineral já se encontra bastante fragmentado, com cerca de 92,6% das suas partículas com granulometrias médias abaixo de 3,2 mm, o que poderia significar a existência de teores de até 100% de finos, se fosse adotada a mesma metodologia de classificação aplicada aos carvões vegetais. É por isto que, antes de ser conduzido para o bojo do alto-forno siderúrgico, o carvão mineral importado deve ser submetido ao processo de “coqueificação”, que consiste no aumento da granulometria média das partículas, em ambientes com temperaturas em torno de 1.100 °C.

3.2 Ensaios de moabilidade dos carvões

Os carvões, antes de serem injetados nas ventaneiras dos altos-fornos, devem ser previamente moídos até a granulometria de, aproximadamente, 0,075 mm (200 mesh). No Quadro 1 estão os valores médios observados para os graus de moabilidade dos carvões.

Os valores médios dos graus de moabilidade dos carvões, apresentados no Quadro 1, indicam que o carvão mineral utilizado pela Companhia Siderúrgica Nacional apresenta dureza estatisticamente superior àquelas apresentadas pelos carvões vegetais da UFRRJ e da Saint Gobain Canalização (113,8 e 125,3%, respectivamente). A maior dureza do carvão resulta em maiores tempos de moagem, menores produtividades e maiores desgastes dos equipamentos envolvidos no processo de pulverização dos carvões. O menor grau de moabilidade do carvão mineral resultou de uma série de fatores intrínsecos a ele, dentre os quais se destaca a sua baixa porosidade (Quadro 3).

3.3 Ensaios das densidades dos carvões

O Quadro 2 apresenta os valores médios das densidades do granel (kg mdc^{-1}), aparente (kg mdc^{-1}) e verdadeira (g cm^{-3}) dos carvões vegetais da UFRRJ e da Saint Gobain Canalização, bem como do carvão mineral da Companhia Siderúrgica Nacional.

De acordo com os valores médios apresentados no Quadro 2, dentre os carvões analisados, o carvão mineral da Companhia Siderúrgica Nacional foi o que apresentou as maiores densidades do granel e aparente (kg mdc^{-1}). Em relação à qualidade dos carvões para fins siderúrgicos, evidencia-se a importância das suas densidades. As densidades do granel e aparente, por exemplo, relacionam-se com importantes aspectos operacionais e produtivos das usinas siderúrgicas. Quanto maiores forem as referidas densidades, menores serão os custos de

transporte e de armazenamento do carvão e, simultaneamente, melhor será o aproveitamento do volume útil do alto-forno, permitindo a incrementação da sua produtividade em um determinado espaço de tempo.

Em relação especificamente à densidade do granel, o carvão mineral apresentou valor médio 96,8 e 120,4% superior aos valores médios relacionados aos carvões vegetais da UFRRJ e da Saint Gobain Canalização, respectivamente. A densidade aparente do carvão mineral, por sua vez, apresentou-se 61,4 e 63% superior às mesmas variáveis dos referidos carvões vegetais. Não ocorreram diferenças significativas entre as densidades verdadeiras dos carvões analisados. Não havendo prejuízos para as outras propriedades, as densidades dos carvões devem ser as maiores possíveis. Desta forma, tendo por base apenas as densidades, o carvão mineral seria o mais indicado para fins siderúrgicos.

Quadro 1 – Valores médios dos graus de moabilidade dos carvões (NBR 8739)*

Table 1 – Medium values of grindability degrees of coals

| Procedência do Carvão | Grau de Moabilidade |
|---|---------------------|
| UFRRJ (carvão vegetal) | 93,0 ^a |
| Saint Gobain Canalização (carvão vegetal) | 98,0 ^a |
| CSN (carvão mineral importado da África do Sul) | 43,5 ^b |

* Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si a 99% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Quadro 2 – Valores médios das densidades do granel (kg mdc^{-1}), aparente (kg mdc^{-1}) e verdadeira (kg mdc^{-1}) dos carvões vegetais da UFRRJ e da Saint Gobain Canalização e do carvão mineral da Companhia Siderúrgica Nacional*

Table 2 – Medium values of barn (kg mdc^{-1}), apparent (kg mdc^{-1}) and true (kg mdc^{-1}) densities of UFRRJ and Saint Gobain vegetable coals and National Metallurgical Company mineral coal

| Procedência do Carvão | Densidade do Carvão (kg mdc^{-1}) | | |
|------------------------|--|------------------|--------------------|
| | Granel | Aparente | Verdadeira |
| UFRRJ (vegetal) | 280 ^b | 314 ^b | 1.611 ^a |
| Saint Gobain (vegetal) | 250 ^b | 311 ^b | 1.482 ^a |
| CSN (mineral) | 551 ^a | 507 ^a | 1.412 ^a |

* Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si a 99% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

3.4 Porosidade dos carvões

No Quadro 3 estão as porosidades médias dos carvões vegetais da UFRRJ e da Saint Gobain Canalização, bem como do carvão mineral Optimum, utilizado pela Companhia Siderúrgica Nacional, importado da África do Sul.

Quadro 3 – Valores médios das porosidades dos carvões vegetais da UFRRJ e da Saint Gobain Canalização e do carvão mineral da Companhia Siderúrgica Nacional*

Table 3 – Mean porosity values of UFRRJ and Saint Gobain vegetable coal and NSN mineral coal

| Procedência do Carvão | Porosidade do Carvão (%) |
|------------------------|--------------------------|
| UFRRJ (vegetal) | 80,77 ^a |
| Saint Gobain (vegetal) | 79,07 ^a |
| CSN (mineral) | 63,31 ^b |

* Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si a 99% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os valores médios das porosidades dos carvões, apresentados no Quadro 3, denotam a igualdade estatística entre as porosidades dos carvões vegetais da UFRRJ e da Saint Gobain Canalização, que, por sua vez, foram estatisticamente superiores à porosidade apresentada pelo carvão mineral da CSN.

Embora a temperatura máxima de pirólise não tenha sido objeto desta pesquisa, Blankenhorn et al. (1978) correlacionam-na com a porosidade do carvão vegetal. Portanto, a igualdade estatística entre as porosidades dos carvões vegetais deve-se, possivelmente, à utilização de temperaturas máximas próximas entre si, no decorrer do processo de carbonização. A menor porosidade do carvão mineral, por sua vez, pode estar associada às próprias condições da sua formação, caracterizadas por longos períodos de transformações.

4 CONCLUSÕES

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

1^a) Os carvões vegetais da UFRRJ e da Saint Gobain Canalização apresentam teores médios de finos (21,2 e 19,0%, respectivamente) inferiores àqueles apresentados pelo carvão mineral importado da África do Sul pela CSN - Companhia Siderúrgica Nacional.

2^a) Mantendo-se o mesmo critério de análise estabelecido para os carvões vegetais, o teor de finos do carvão mineral estará próximo de 100 %, o que implica a necessidade de sua coqueificação.

3^a) Os finos do carvão mineral importado pela CSN apresentam grau de moabilidade inferior (maior dureza) aos dos finos dos carvões vegetais da UFRRJ e da Saint Gobain Canalização (113,8 e 125,3%, respectivamente). A maior dureza do carvão mineral pode resultar em maior tempo de moagem, menor produtividade e maior desgaste dos equipamentos envolvidos no processo de pulverização desse tipo de carvão.

4^a) O carvão mineral da CSN apresenta densidades do granel e aparente superiores àquelas apresentadas pelos carvões vegetais da UFRRJ e da Saint Gobain Canalização. Constatou-se que não há diferença estatística entre as densidades verdadeiras dos carvões.

5^a) Há uma equiparação estatística entre as porosidades dos carvões vegetais da UFRRJ e da Saint Gobain Canalização. Ainda sob o ponto de vista estatístico, as porosidades dos carvões vegetais são superiores à porosidade apresentada pelo carvão mineral importado pela Companhia Siderúrgica Nacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

- ANTUNES, R. C. **Briquetagem de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC - Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982. p. 199-206. (publicação técnica).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – ABRACAVE. **Anuários Estatísticos**. Disponível em: <http://www.abracave.com.br/index_anuario.html>. Acesso em: 2000.
- ASSIS, P. S. **Injeção de materiais pulverizados em altos-fornos**. Volta Redonda: 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: Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982. p. 286-288. (Publicação técnica)
- BLANKENHORN, P. R. et al. Porosity and pore size distribution of black cherry carbonized in inert atmosphere. **Wood Science**, n. 1, p. 25-99, 1978.
- 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. p. 17-43, 1999.
- CARVALHO, J. F.; MUNIZ, B. H. Redução de minérios - uma constante consolidação do estudo de novos processos. **Revista Metalúrgica**, n. 47, n. 51, p. 515-516, 1996.
- CASTRO, L. F. A. Aspectos termodinâmicos e cinéticos da injeção de carvão e outros materiais no alto-forno. **Revista Metalúrgica**, n. 54, p. 45-93, 1999.
- INFOTEC/PRÓ-CARVÃO – Informativo Técnico do Programa de Qualificação da Cadeia Produtiva do Carvão Vegetal do Estado de São Paulo. **Carbonização da madeira e produtos obtidos**. Piracicaba, n. 1, 2000. não paginado
- INFOTEC/PRÓ-CARVÃO – Informativo Técnico do Programa de Qualificação da Cadeia Produtiva do Carvão Vegetal do Estado de São Paulo. **Carvão vegetal de eucalipto**. Piracicaba, n. 2, 2001. não paginado
- 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.
- 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**. 1988. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Seropédica, 1988.
- 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.
- RIBAS, M. A.; OSÓRIO, E.; VILELA, A. C. F. Comportamento dos carvões injetados no alto forno. **Revista Metalúrgica**, n. 55, p. 513-516, 1999.