

CARACTERIZAÇÃO DE CARVÕES PARA INJEÇÃO EM ALTO-FORNO¹

*Keyla Djamyla Chaves dos Santos*²

*Eduardo Osório*³

*Antônio Cezar Faria Vilela*⁴

RESUMO

O carvão pulverizado tem sido injetado em quantidades cada vez maiores nas ventaneiras do alto-forno a fim de substituir parcialmente o coque e reduzir custos de produção. Quanto maior a quantidade de carvão injetado, maior a possibilidade de ocorrer problemas operacionais no alto-forno. As propriedades do carvão injetado têm influência direta na eficiência da combustão e na estabilidade do processo de injeção, por isso o carvão deve possuir boa combustibilidade e atender às exigências do alto-forno. Assim, para se otimizar o processo (altas taxas de injeção com alta produtividade) é requerido um estudo mais aprofundado das propriedades do carvão. Este trabalho tem por objetivo caracterizar, quanto às propriedades químicas e petrográficas, diferentes tipos de carvões (importados e nacionais) com vistas à utilização no processo de injeção de carvão pulverizado no alto-forno. Para isto, os carvões foram submetidos aos seguintes ensaios: análise imediata (cinzas, matéria volátil e carbono fixo) e elemental (carbono, hidrogênio, enxofre, nitrogênio e oxigênio), análise da composição das cinzas, determinação do poder refletor e grupo de macerais. Para o estudo da combustibilidade foram realizados testes de reatividade ao CO₂ em termobalança e ensaios de combustão em forno de queda livre (DTF). Com os resultados da caracterização e combustibilidade será possível avaliar o potencial de utilização dos carvões no processo e também formular misturas de diferentes carvões cujo somatório das propriedades atendam aos requisitos do alto-forno.

Palavras Chave: carvão, injeção em alto-forno, caracterização

¹Contribuição técnica ao 5º Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - ENEMET, Belo Horizonte/Ouro Preto, MG, 28/07/2005

²Graduanda em Engenharia Metalúrgica pela UFRGS, Bolsista de Iniciação Científica do Laboratório de Siderurgia - LASID / Centro de Tecnologia / UFRGS

³Engenheiro Metalúrgico, Doutor do Laboratório de Siderurgia - LASID / Centro de Tecnologia / UFRGS

⁴Prof. Dr.-Ing, Coordenador do Laboratório de Siderurgia - LASID / Centro de Tecnologia / UFRGS

1. INTRODUÇÃO

O grande emprego do carvão na siderurgia é para a produção de coque de alto-forno. Entretanto, menos de 15% das reservas mundiais de carvão possuem as propriedades requeridas para a coqueificação, o que ocasiona um alto valor deste tipo de produto no mercado internacional (VILELA, 2001).

No Brasil, o maior consumo de carvão é justamente na produção de coque de alto-forno. Atualmente, todo o carvão para este fim é importado, resultando em altos custos. Em vista disso, têm-se buscado novas tecnologias que possibilitem a substituição de parte do coque como redutor.

Neste âmbito, o processo mais praticado é o PCI (injeção de carvão pulverizado), o qual utiliza carvões sem propriedades coqueificantes para gerar energia e gases redutores no processo de fabricação do ferro-gusa. Além disso, a injeção de carvão pulverizado possibilita o uso de uma grande variedade de carvões, visto que as propriedades exigidas são muito flexíveis dentro de limites adequados. Logo, o processo de PCI leva a uma sensível redução de custos ao empregar carvões sem características aglutinantes e, também, ao ampliar a escolha do carvão a ser utilizado.

A busca pelo uso de carvões mais baratos e por taxas de injeção cada vez maiores faz com que seja necessário um estudo aprofundado das propriedades do carvão, já que estas influenciam diretamente a eficiência e estabilidade do processo. Assim, a otimização deste (altas taxas de injeção com alta produtividade) está relacionada à realização de uma ampla caracterização do carvão a ser injetado.

O objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade de utilização de um carvão nacional em PCI através de sua caracterização química, petrográfica e do comportamento aos ensaios de reatividade, comparando-se os parâmetros obtidos aos usualmente praticados na indústria siderúrgica.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Matérias-primas

Foram utilizadas amostras de um carvão gaúcho e, para fins comparativos, dois carvões importados usados em PCI, sendo um baixo rank e o outro alto rank, identificados como carvão A e carvão B, respectivamente.

2.2. Metodologia experimental

As amostras individuais dos carvões foram submetidas aos seguintes ensaios:

- Caracterização química: análise imediata (cinzas, matéria volátil e carbono fixo) e elementar (carbono, hidrogênio, enxofre, nitrogênio e oxigênio), poder calorífico e análise da composição das cinzas;
- Caracterização petrográfica: análise do grupo de macerais e determinação do poder refletor da vitrinita.

Para o estudo da combustibilidade foram realizados ensaios de combustão em forno de queda livre (DTF) e ensaios de reatividade em termobalança.

Caracterização Química

Análise Imediata - Consiste na determinação dos teores de umidade (NBR 8293), matéria volátil (NBR 8290), cinzas (NBR 8289) e carbono fixo (por diferença), sendo os resultados expressos normalmente em base seca.

Análise Elementar - Indica a composição química do carvão em termos de hidrogênio, carbono, nitrogênio, oxigênio e enxofre. O teor de oxigênio é dado pela diferença em relação a 100%, incluindo-se os teores de halogênios. Os resultados são dados em base seca e isenta de cinzas.

Análise Química das Cinzas – Proporciona a determinação dos elementos maiores e menores nas cinzas de carvão, por meio da fluorescência de raios X, sendo que o resultado é expresso sob a forma de óxidos (ASTM D 4326 – 94).

Caracterização Petrográfica

Análise dos Grupos de Macerais (Vitrinita, Liptinita e Inertinita) – Realizada ao microscópio de luz refletida, tem por objetivo determinar a proporção de macerais no carvão.

Poder Refletor da Vitrinita – Avalia o grau de carbonificação ou “rank” do carvão.

Ensaio de Combustão em Forno DTF

Fundamentos da combustão do carvão são estudados por meio de um reator de queda livre (DTF). São reatores usados geralmente para avaliar a combustão de um carvão isolado ou partículas de char num fluxo de arraste. O reator é um forno que possui condições de operar a 1550°C, consistindo de dois tubos concêntricos de alumina. O gás reatante é injetado a 750 l/h juntamente com um jato de gás não pré-aquecido (150 l/h) através de um tubo de injeção com resfriamento no topo do tubo interno. As partículas de carvão com granulometria entre 20 e 200 microns são alimentadas a uma taxa de 1g.min⁻¹. O tempo de residência é estimado em 0,3s. Os chars deixam o reator através do tubo coletor e uma quantidade extra de nitrogênio é adicionada aos gases de exaustão para resfriar a reação e aumentar a eficiência do ciclone.

Nossos ensaios foram realizados pelo INCAR, Espanha, a uma temperatura de 1300°C, tendo como gás reatante o oxigênio. A avaliação da taxa de combustão é feita sob atmosferas com diferentes proporções (2,5; 5,0 e 10%) de O₂ em N₂. As partículas de char após deixarem o reator são recolhidas e analisadas. Por meio da análise, o gráfico da fração de matéria carbonosa convertida em função do teor de oxigênio é plotado.

Ensaio de Reatividade em Termobalança

Os testes de reatividade foram realizados em termobalança fabricada pela NETZSCH, modelo STA-409. Na câmara de reação foi colocado um cadinho tipo copo. Os parâmetros utilizados foram baseados em trabalhos anteriores realizados no Laboratório de Siderurgia – LASID/Escola de Engenharia da UFRGS (LANSARIN, 1986).

Na primeira parte do teste (pirólise) a amostra de 30 mg, com granulometria inferior a 0,25 mm, é aquecida até 1050°C a uma taxa de aquecimento de 30°C/min,

sob uma vazão de N₂ de 50ml.min⁻¹. A amostra é mantida nesta temperatura até o final da perda dos voláteis. Após a estabilização da perda dos voláteis, tem início o teste de reatividade, com a troca para o gás reagente (CO₂) a uma vazão de 100ml.min⁻¹, até atingir novamente a estabilização da perda de massa.

A partir dos pontos de perda de massa por consumo do carbono fixo ao CO₂, calculou-se a conversão para um determinado tempo. A conversão é uma maneira de se representar a reatividade do carvão e é dada por

$$X = \frac{(m_0 - m)}{(m_0 - m_c)}$$

onde m_0 é a massa quando inicia o consumo de carbono fixo ao CO₂, m é a massa em um determinado tempo de reação e m_c é a massa das cinzas. Para uma reatividade representativa, é usual se ter um valor de conversão como referência. Para este trabalho, adotou-se 50% de conversão como reatividade padrão.

Através dos resultados obtidos nesse teste, também se calculou a taxa de reação, a qual descreve a reatividade da amostra. Esta é calculada a partir da tangente da reta que representa o melhor ajuste linear entre os pontos da perda de massa, ocorrida na isoterma de 1050 °C, em função do tempo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra o resultado da análise imediata e elementar dos carvões.

Tabela 1. Análise imediata (matéria volátil, cinzas e umidade) e elementar dos carvões

Caracterização Química (%)	Carvão Gaúcho	Carvão A	Carvão B
C _{fix(b.s.)}	50,00	52,48	78,73
Cinza _(b.s.)	17,00	9,58	6,91
MV _(b.s.)	33,00	37,94	14,36
Enxofre total _(b.s.)	1,30	0,78	0,49

b.s. = base seca

Observa-se na Tabela 1 o elevado teor de cinzas do carvão gaúcho, superior à faixa de 10% adequado ao processo de PCI. As cinzas são prejudiciais porque diminuem a temperatura adiabática de chama, aumentando as necessidades térmicas do forno.

O teor de enxofre geralmente utilizado em PCI está na faixa de 1%. Nota-se que o teor de enxofre do carvão gaúcho é de 1,3%. Elevados teores de enxofre representam maiores gastos na produção do ferro-gusa devido ao processo de dessulfuração.

Na Tabela 2 apresenta-se o resultado da análise química das cinzas.

Tabela 2. Composição química das cinzas

Análise das Cinzas (%)	Carvão Gaúcho	Carvão A	Carvão B
K ₂ O	1,20	1,28	2,18
Na ₂ O	0,10	0,40	0,34
P ₂ O ₅	0,05	0,21	1,84

Pode ser visto na Tabela 2 que o teor de álcalis (K₂O e Na₂O) do carvão gaúcho é inferior ao dos carvões importados. Elevados teores de álcalis podem causar danos aos refratários do alto-forno (formação de “cascões”) e catalisar a gaseificação do coque, diminuindo a resistência do mesmo e gerando finos de coque (GOMES, 2004). Os finos prejudicam a permeabilidade da carga aos gases ascendentes e ao fluxo de ferro líquido descendente no ambiente do alto-forno, comprometendo a redução ideal do minério.

A Tabela 2 também exhibe o baixo teor de fósforo do carvão nacional em comparação aos demais, sendo este mais um aspecto positivo. Todo o fósforo encontrado no carvão acumula-se no ferro-gusa, o que acarreta maiores custos no processo de desfosforação na aciaria. Portanto, altos teores de P₂O₅ devem ser evitados.

A análise petrográfica e poder refletor da vitrinita são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Análise petrográfica e poder refletor da vitrinita

Componentes Petrográficos (%)	Carvão Gaúcho	Carvão A	Carvão B
Vitrinita	91,0	78,4	51,8
Liptinita	4,4	1,0	--
Inertinita	4,6	20,6	48,2
Poder Refletor (%)	0,48	0,54	1,69

Na Tabela 3 vê-se que o teor de vitrinita do carvão gaúcho é igual a 91%, índice bastante elevado.

O baixo poder refletor do carvão gaúcho evidencia seu baixo grau de carbonificação. Quanto menor o rank maior a reatividade do carvão. A influencia dos macerais é secundária.

A Fig. 1 apresenta o gráfico obtido através dos ensaios de combustão em forno DTF.

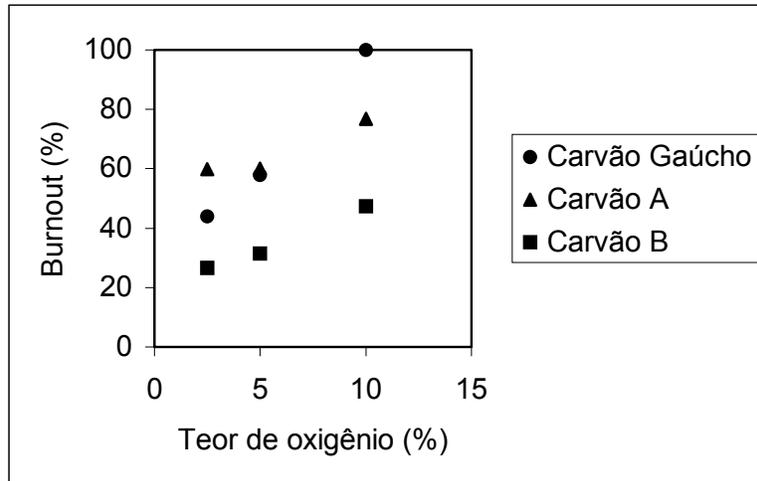


Figura 1. Fração de matéria carbonosa convertida em função do teor de oxigênio

Analisando a Fig. 1, vemos que o carvão B apresentou burnout significativamente menor do que o dos carvões de baixo rank. Para a atmosfera de 2,5%, o carvão A apresentou um burnout maior do que o encontrado para o carvão gaúcho. Entretanto, com o aumento do teor de oxigênio, este passou a ter maior burnout.

A partir dos pontos de reação do carbono fixo ao CO₂ obtidos no ensaio termogravimétrico, o gráfico de conversão em função do tempo para as amostras dos carvões é plotado. Esse gráfico está representado na Fig. 2.

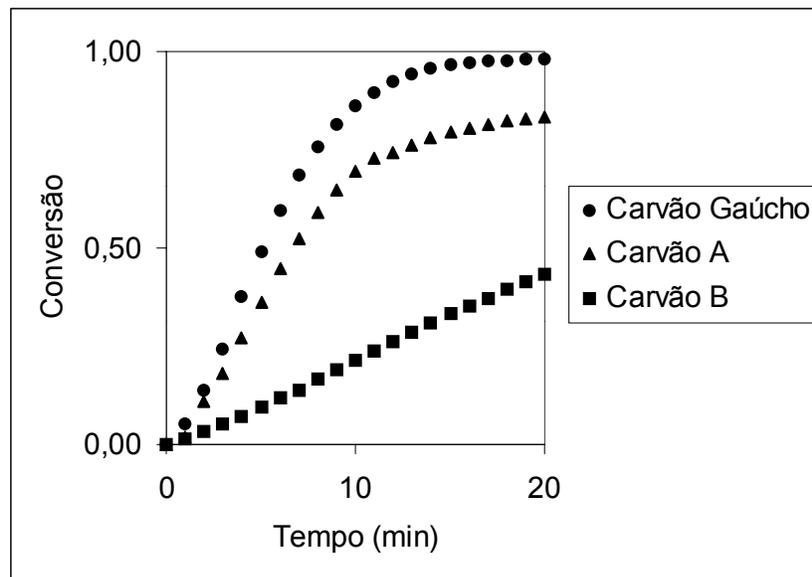


Figura 2. Fração da matéria carbonosa que reage com o CO₂ durante 30 minutos de isoterma

Nas curvas da Fig. 2, observa-se que o carvão gaúcho atinge a conversão de 50% aproximadamente aos 6 minutos e o carvão A aos 7,5 minutos, aproximadamente. Já para o carvão B a conversão de 50% só é atingida em

aproximadamente 25 minutos. O tempo necessário para atingir a conversão de 50% reflete a reatividade do carvão. Para o caso estudado, observa-se a maior reatividade do carvão gaúcho em relação aos importados.

Na Tabela 4 são apresentadas as conversões obtidas para o tempo de 6 min, referente à conversão de 50% do carvão gaúcho, bem como a taxa de reação máxima dos carvões.

Tabela 4. Conversão atingida no tempo de 6 minutos e taxa de reação máxima

	Conversão	Taxa de reação (min^{-1})
Carvão Gaúcho	0,50	0,0710
Carvão A	0,45	0,0628
Carvão B	0,12	0,0401

A maior conversão atingida pelo carvão nacional pode ser relacionada ao seu menor rank em relação aos carvões A e B. Os carvões de baixo grau de carbonificação são mais reativos, pois suas cadeias de carbono são mais desorganizadas, oferecendo maior acessibilidade aos gases oxidantes.

Ainda utilizando-se os resultados obtidos nos ensaios de reatividade em termobalança calcula-se a taxa de reação máxima, a qual é uma maneira de se avaliar a reatividade. Conforme é mostrado na Tabela 4, a taxa de reação máxima do carvão gaúcho é a mais elevada, sendo quase duas vezes maior do que a obtida para o carvão B.

4. CONCLUSÕES

Com base em todas as considerações feitas neste trabalho, podemos destacar as seguintes conclusões:

- A caracterização química mostra que o carvão gaúcho possui um alto teor de cinzas e de enxofre, inviabilizando o seu uso individual em PCI;
- Quanto à composição química das cinzas, verifica-se que o teor de álcalis e de fósforo do carvão gaúcho é significativamente menor do que os dos importados;
- Os carvões de baixo rank se mostraram mais reativos do que o de alto rank no ensaio de combustão em DTF;
- Na análise termogravimétrica, o carvão gaúcho é o mais reativo, apresentando maior taxa máxima de reação, bem como menor tempo necessário para conversão de 50%;
- A avaliação da reatividade feita através dos ensaios no forno DTF e na termobalança mostraram boa concordância.

Os dados obtidos nesta fase do trabalho serão utilizados para estabelecer as condições de misturas do carvão gaúcho com os importados para uso em PCI.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio do CNPq.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GOMES, M. L. I. In: GOMES, M. L. I. (Ed.) **Avaliação da viabilidade técnica da utilização do carvão Faxinal com importados para injeção em altos-fornos**, Porto Alegre, 2004.
2. LANSARIN, M. A. In: LANSARIN, M. A. (Ed.) **Gaseificação de carvão mineral com dióxido de carbono em um reator diferencial**, Porto Alegre, 1986.
3. VILELA, A.C. F. OSÓRIO, E. Utilização do carvão na metalurgia. In: FEPAM TEIXEIRA, E. C., PIRES, M. J. R. (Ed.) . **Meio Ambiente e Carvão – Impactos da exploração e utilização**. Porto Alegre, 2001, 2 ed. cap. 8, p.149 -171.

COALS CHARACTERIZATION FOR USING IN PULVERIZED COAL INJECTION PROCESS¹

Keyla Djamyla Chaves dos Santos²
Eduardo Osório³
Antônio Cezar Faria Vilela⁴

ABSTRACT

In the last decade, the pulverized coal has been injected in increasing rates in the tuyeres of the blast furnace in order to substitute the coke partially and to reduce production costs.

The properties of the injected coal have direct influence on the efficiency of the combustion and the stability of the PCI process (pulverized coal injection), therefore the coal should possess characteristics such as good combustibility. Thus, a knowledge of these properties is essential to select a suitable coal.

The aim of this study is to characterize different types of coals (Brazilian and imported ones) for using in PCI, referring to the chemical, petrographical and reactivity aspects. The reactivity evaluation was based on monitoring the mass loss of the samples in carbon dioxide atmosphere during termogravimetric tests. The reactivity was also evaluated by combustion tests in a drop tube furnace.

Based on the results obtained, it will be possible to evaluate the usage potential of the coals in the PCI process and also to formulate coal blends between the South Brazilian coal and the imported ones, so that such blends are inside the parameters for application in PCI.

Keywords: coal, pulverized coal injection, characterization

¹Technical contribution to the 5º Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - ENEMET, Belo Horizonte/Ouro Preto, Brazil, 07/28/2005

²Student of Metallurgical Engineering at UFRGS, Scholarship holder of the Laboratório de Siderurgia - LASID/Centro de Tecnologia/UFRGS

³Metallurgical Engineer, Doctor of the Laboratório de Siderurgia - LASID/Centro de Tecnologia/UFRGS Chemical Engineer, after-graduating of the PPGEM, Laboratório de Siderurgia - LASID/Centro de Tecnologia/UFRGS

⁴Prof. Dr.-Ing, Coordinator of the Laboratório de Siderurgia - LASID/Centro de Tecnologia/UFRGS