

## Avanços na injeção de carvão pulverizado para a sua aplicação em altos-fornos

Paulo Santos Assis

Escola de Minas/UFOP-REDEMAT

E-mail: assis@em.ufop.br

Weber de Brito Martins

FAPEMIG-REDEMAT-VAMTEC

E-mail: weber.bm@bol.com.br

Cláudio Batista Vieira

Escola de Minas/UFOP-REDEMAT

E-mail: ufop@terra.com.br

### Resumo

Alguns dados sobre a injeção de carvão pulverizado são mostrados bem como uma descrição do modelo de combustão de partículas com elevado gradiente térmico construído na Escola de Minas - UFOP. Usando misturas de três carvões, bem como pré-aquecimento de carvão, foi possível constatar que: o uso de misturas de mais de dois carvões bem como o seu pré-aquecimento podem ser duas técnicas a serem usadas em altos-fornos no sentido de melhorar ainda mais os rendimentos obtidos nos reatores que usam a técnica de injeção.

**Palavras-chave:** Resíduos, carvão, injeção.

### Abstract

*Some data about coal powder injection have been shown and one physical model, with high thermal gradient constructed at Escola de Minas-UFOP is described. Using mixture of coal (3) and pre-heating of the coal some tests have been done, giving the conclusions below: pre heating of coal could be a good idea for improving the results obtained into the blast furnace, so mixture of more than two coals, not common practiced, could improve the combustion rate.*

**Keywords:** Wastes, pig iron, injection.

## 1. Introdução

Sabe-se que a tecnologia de injeção de carvão pulverizado tem sido praticada no mundo inteiro. Atualmente, existem mais de 400 altos-fornos que praticam esta técnica, sendo que em mais de 70% de todos os altos-fornos no mundo já se usa algum tipo de injeção de materiais sólidos <sup>(1)</sup>. No caso específico do carvão vegetal, o Brasil detém a tecnologia, sendo inicialmente desenvolvida pela Acesita, ainda nos idos de 1970<sup>(2)</sup>, sendo que, para usinas integradas, todos os altos-fornos a carvão vegetal já injetam esse reductor em suas ventaneiras.

As principais variáveis que levaram ao crescimento vertiginoso do número de instalações de injeção ocorrido a partir do início da década de 1980 estão relacionadas com a redução do custo de produção de gusa, substituição do óleo combustível (devido ao aumento do preço do barril de petróleo de 12 a 356 USD/barril, ocorrido em 1979); aproveitamento de resíduos, qualidade do ferro gusa; injeção de outros materiais como: finos de minério, fundentes, plásticos, papel e outros, com resultados na literatura <sup>(3,4,5)</sup>.

É claro que a injeção de carvão pulverizado (ICP) deve implicar reduções significativas no custo de produção de gusa. Nesse aspecto, é fundamental que maiores taxas de injeção sejam praticadas, com ganhos significativos no con-

sumo de reductor carregado pelo topo do alto-forno. Normalmente, quando se injetam maiores taxas de ICP, acima de 180 ~ 200 kg/t gusa, não existe ganho proporcional no consumo de reductor. Assim, esforços no sentido de se aumentar a taxa de combustão do carvão pulverizado certamente afetarão a taxa de injeção, aí, sim, haveria ganhos financeiros na produção de gusa.

A Figura 1 mostra um esquema de um equipamento, desenvolvido na Escola de Minas-UFOP, e sua similaridade com o que ocorre em altos-fornos, para fazer simulações de tal sorte a determinar o índice de combustão. Dessa forma, não existe necessidade de se fazerem ensaios industriais que sempre são onerosos e nem sempre levam a conclusões contundentes.

Deve ser comentado que a parte esquerda da figura corresponde a unidade de laboratório desenvolvida e montada na Escola de Minas. Ela faz a simulação em condições de gradiente térmico ( $10^5$  K/s) e de tempo de residência da partícula ( $10^{-2}$  s) similares ao que ocorre no alto-forno, cujo esquema é mostrado no lado direito da figura em epígrafe.

Essa contribuição mostra duas alternativas que existem para se elevar a taxa de combustão obtida em altos-fornos, além dos valores atualmente obtidos.

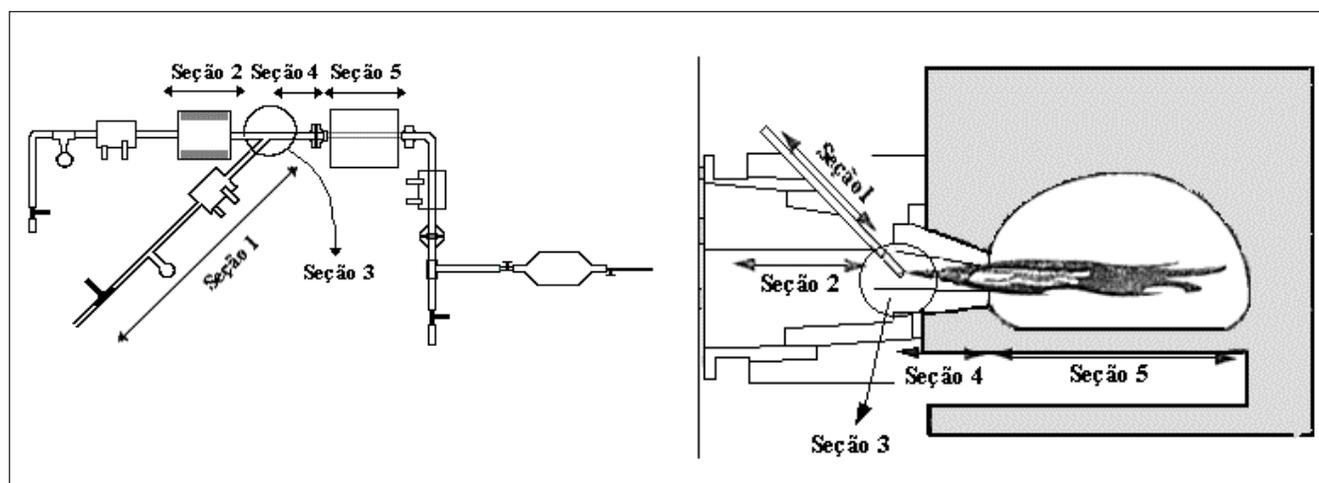
## 2. Descrição dos ensaios

O método usado está bem descrito em outras publicações nacionais e internacionais<sup>(3,4,5,6,7)</sup>. As condições usadas para os ensaios foram: taxa de injeção 100 e 200 kg/t, consumo equivalente de  $O_2 = 245 Nm^3/t$ .

Os materiais ensaiados procederam da CST, Açominas e COSIPA, sendo que foram praticadas misturas de três carvões e pré-aquecimento do carvão até temperaturas abaixo da temperatura de ignição, determinadas em equipamento existente na RWTH-Aachen. A Tabela 1 identifica as amostras ensaiadas, em função das condições dos ensaios.

**Tabela 1** - Identificação das misturas de carvão (valores em % peso).

Amostra	A	B	C
1	100		
2		100	
3			100
4	50	50	
5		50	50
6	20	50	30
7	20	30	50
8	50	30	20
9	50	20	30



**Figura 1** - Esquema da instalação da Escola de Minas-UFOP e a similaridade com o que ocorre no alto-forno.

Os três carvões ensaiados são carvões minerais usualmente empregados nos processos de mistura para coqueificação das empresas citadas, bem como sendo utilizados para fins de injeção. Sob o ponto de vista de qualidade química, os três carvões podem ser identificados como baixo volátil (A), médio volátil (B) e alto volátil (C).

Os valores correspondentes aos teores de voláteis dos três carvões ensaiados A, B e C são, respectivamente: 8 a 10 %, 16 a 20 % e 28 a 34 %.

As misturas feitas correspondem aos valores em massa de cada carvão, sendo que foi feita manualmente, procedendo-se a sua mistura física e homogeneização durante 5 min, após a pesagem e a sua colocação em um recipiente de vidro transparente de 200 ml. A amostra misturada fisicamente era então colocada no local de injeção, o que é mostrado na Figura 1.

Para as amostras 1,5 e 9, foi praticado um pré-aquecimento a 250°C.

Deve ser comentado que não existe na literatura até o momento nenhum trabalho técnico que mostre o efeito de se misturar mais de dois carvões nos índices de combustão, bem como o pré-aquecimento do carvão mineral pulverizado também não tem sido alvo de publicações científicas.

As amostras foram analisadas na Vamtec, para, então, após os ensaios, se calcular o índice (ou taxa) de combustão.

Cada amostra foi colocada no local de injeção mostrado na Figura 1, após o que, acionadas as duas válvulas solenóides, procedia-se a combustão do material (utilizando-se oxigênio puro), sendo o gás coletado analisado em um equipamento ORSAT. De posse da análise e de um modelo desenvolvido anteriormente<sup>(5)</sup>, determinava-se o índice de combustão.

### 3. Resultados obtidos

Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 2. Deve ser salientado que os resultados mostrados são o valor

médio de dez ensaios. As amostras de 1 a 9 foram preparadas de tal sorte que a temperatura do carvão estivesse na temperatura ambiente e as de 10 a 12 os carvões foram pré-aquecidos a 250°C.

Os ensaios de 1 a 9 correspondem à utilização das amostras 1 a 9, nas composições das misturas físicas retrorreferenciadas. Os ensaios 10 a 12 correspondem às amostras 1, 5 e 9, respectivamente, sendo que nesse caso as mesmas foram pré-aquecidas em uma mufla a 250°C.

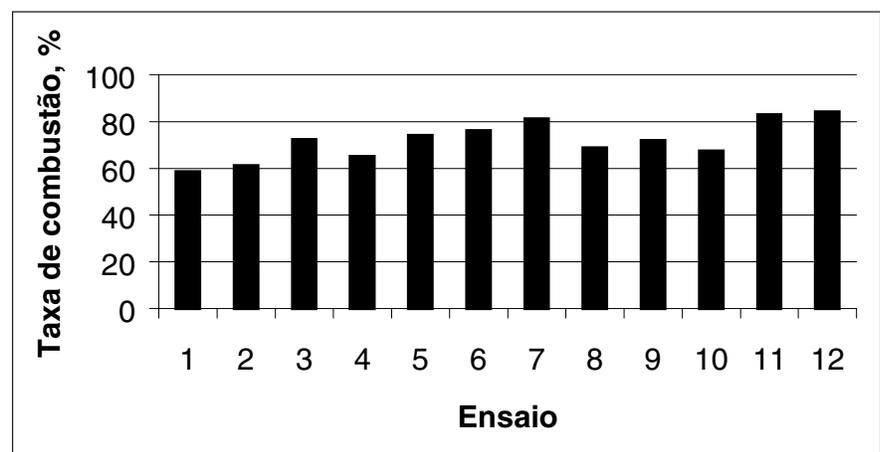
A Figura 2 mostra os resultados médios obtidos.

### 4. Discussão

Os resultados podem ser parcialmente explicados considerando os dados de literatura. Um ponto que tem sido fixado na literatura é o efeito do teor de voláteis na taxa de combustão<sup>(7)</sup>. Usando três tipos de carvões, pode ser observado que quando o teor de voláteis

**Tabela 2** - Resultados obtidos usando amostras na temperatura ambiente e pré-aquecidas a 250°C.

Ensaio	Taxa de combustão (%)
1	58,5
2	61,2
3	72,3
4	65,1
5	74,1
6	76,2
7	81,2
8	68,8
9	72,0
10	67,5
11	82,9
12	84,1
Amostras 1 a 9 injetadas a T = 25°C	Amostras 10 a 12 pré-aquecidas a 250°C, antes da injeção



**Figura 2** - Resultados obtidos usando o forno-piloto, com elevado gradiente térmico.

dos carvões aumentou, houve um aumento correspondente na taxa de combustão, conforme Korthas.

Normalmente, quando carvões são misturados, existe um aumento no índice de combustão. Esse fato pode ser explicado pelo efeito combinado de pirólise e combustão dos voláteis, que acontece na zona de combustão<sup>(8)</sup>. A Figura 3 mostra os resultados obtidos. Usando um carvão base (17,1% de voláteis), substituindo-se na mistura um baixo (8,2%) por um alto volátil (32%), foi observada uma elevação na taxa de combustão.

Apesar de existir uma extensa literatura sobre o efeito de misturas de dois carvões sobre a taxa de combustão<sup>(9)</sup>, não existe até o momento bibliografia publicada sobre a mistura de mais de dois carvões. A explicação para o fato talvez seja devido à maior dificuldade operacional de se fazer tal expediente.

A Figura 4 mostra os resultados advindos da pesquisa, usando misturas de mais de dois carvões. Deve ser observado que esses resultados são ainda incipientes, visto se tratar de uma primeira pesquisa nesse sentido. Certamente, com o possível interesse das empresas, mais ensaios deverão ser feitos e, mesmo considerando a sua injeção diretamente no alto-forno, esses resultados poderão ser ou não corroborados.

Pode ser observado que na mistura de 20% de A (baixo volátil), 30% de B (médio volátil) e 50% de C (alto volátil) o maior índice de combustão foi obtido.

Possivelmente o mecanismo que explica o fenômeno seja o mesmo, explicado por Assis & Minelli<sup>(8)</sup>. Deve ser salientado que esse fenômeno pode não ocorrer ao mesmo tempo, portanto fundamentando a necessidade de mais testes no equipamento, para verificação dessa hipótese. Finalmente os resultados mostrando o efeito do pré-aquecimento do carvão na taxa de combustão são mostrados na Figura 5. Deve ser salientado que esses resultados são os primeiros disponíveis em laboratório, citados em literatura.

Pode ser observado que, quando um carvão, ou mistura de carvões, é pré-aquecido, existe uma elevação na taxa de combustão. Para os ensaios de 1 a 3 (no gráfico), não houve pré-aquecimen-

to que, enquanto para os três subseqüentes, houve o pré-aquecimento a 250°C. Pode ser visto que, quando um carvão é pré-aquecido, ou mesmo mistura física binária é feita, houve um aumen-

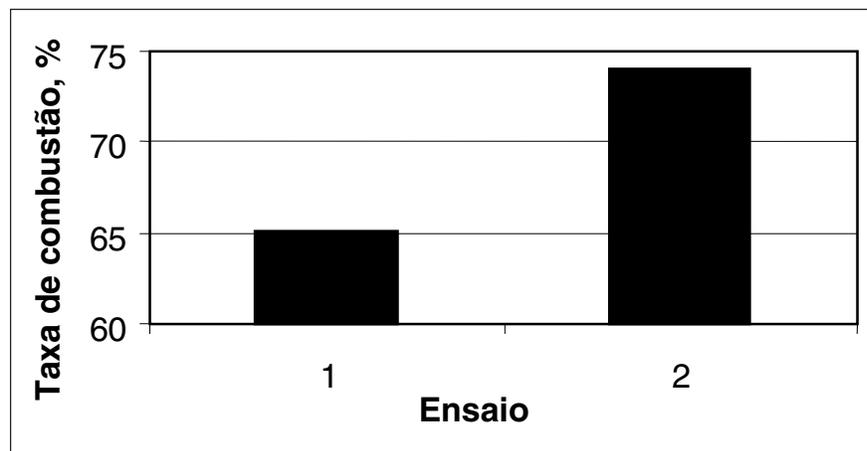


Figura 3 - Gráfico mostrando resultados obtidos usando misturas de dois carvões (amostras 4 e 5). Ensaio 1: BV + MV; Ensaio 2: AV + MV.

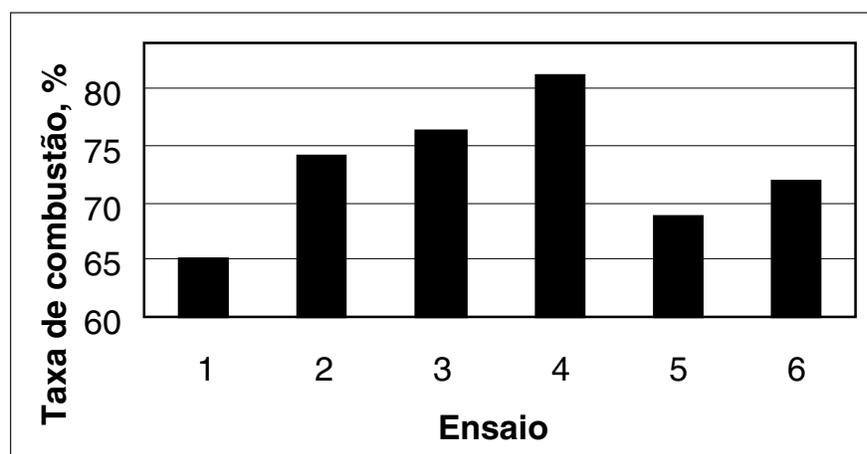


Figura 4 - Efeito da mistura de mais de dois carvões na taxa de combustão.

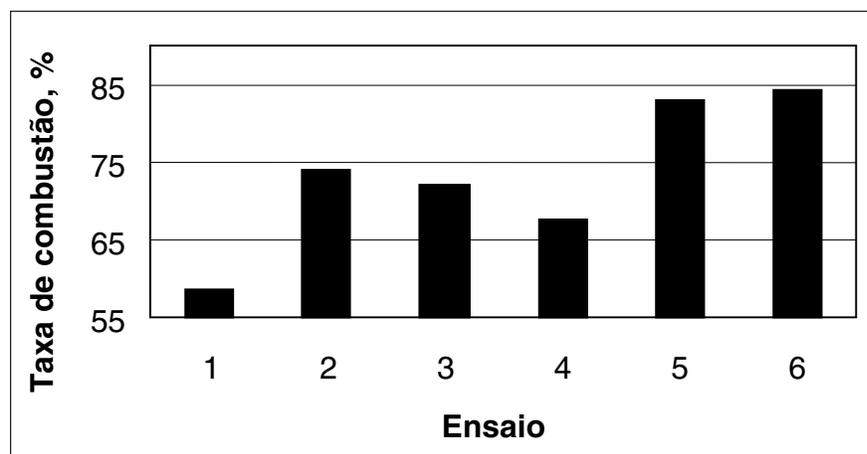


Figura 5 - Efeito do pré-aquecimento do carvão na taxa de combustão.

to de 9 % na taxa de combustão. Todavia, quando a mistura de três carvões (50 % A, 20 % B e 30 % C) foi praticada, então o aumento da taxa de combustão foi de 12,1%. Estes dados poderiam ser explicados pela maior velocidade de pirólise, associada à combustão dos mesmos, ocorrendo na zona de combustão.

Deve ser comentado que um aumento no índice de combustão será necessário para se aumentar a taxa de injeção de carvão pulverizado, sem afetar o escoamento gasoso do alto-forno. Portanto toda e qualquer técnica no sentido de aumento daquele índice certamente propiciará aumento na taxa de injeção, portanto aumentando o resultado financeiro do processo de redução no alto-forno. A prática atual de injeção tem se limitado em valores que se situam entre 200 e 220 kg/t gusa. Um aumento do índice de combustão de carvões usualmente empregados no sistema de injeção, portanto, permitirá que taxas de injeção de carvão de até 250 kg/t gusa possam ser obtidas, sem afetar a permeabilidade do reator.

Nesse sentido, portanto, a contribuição técnica apresentada mostra duas alternativas que não têm sido empregadas na prática operacional e que podem ser valiosas no sentido de se aumentarem mais ainda os níveis de injeção praticados na atualidade.

## 5. Conclusões

Dos ensaios realizados, conclui-se:

- Misturas físicas de mais de dois tipos de carvões apresentam maiores taxas de combustão do que os carvões que as deram origem.
- Pré-aquecimento de carvão a temperaturas abaixo da temperatura de ignição induz a aumento da taxa de combustão.
- Taxas de injeção superiores a 220 kg/t gusa, graças ao emprego de misturas de três carvões contendo diferentes teores de materiais voláteis, podem ser vislumbradas.
- Técnicas de misturas de mais de dois carvões, bem como o pré-aquecimento dos mesmos, podem elevar os níveis de injeção de carvão pulverizado atualmente praticados nos altos-fornos, acima de 200 kg/t gusa, sem causar problemas de permeabilidade na zona úmida.

## 6. Agradecimentos

Ao CNPq, à FAPEMIG e à FINEP pelo auxílio na pesquisa, às empresas AÇOMINAS/CST/COSIPA pelas amostras de carvão usadas em seus altos-fornos.

## 7. Referências Bibliográficas

1. ASSIS, P.S., MARTINS, W.B., JÚNIOR, A.M. *Aspectos técnicos relativos a simulação de injeção de materiais diversos em ventaneiras de altos-fornos*. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, CONEM-2002. João Pessoa, Paraíba: agosto de 2002. 12p.
2. ASSIS, P.S. *Holzkohleeinblasen in den Holzkohlehochofen*. Dr. Dissertation, RWTH Aachen, 1991.
3. ASSIS, P.S. et alii. *Injeção de materiais diversos em altos-fornos*. ABM, 1993.
4. ASSIS, P.S. et alii. *Injeção de materiais plásticos em altos-fornos*. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ALTERNATIVE ROUTES IRON AND STEELMAKING. Perth, Australia, Sept 1999.
5. SOBRINHO, P.J.N. *Comportamento de diferentes materiais injetados através das ventaneiras dos altos-fornos*. REDEMAT: UFOP-CETEC-UEMG, 1998. (Dissertação de Mestrado).
6. YANG, T. *Untersuchungen zum Kohlenstaubeinblasen in den Hochofen*. Dr. Dissertation, RWTH Aachen, 1985.
7. KORTHAS, B. *Untersuchungen der verbrennungsvorgänge hohen Kohlenstaubmengen unter Hochofennahen Bedingungen und ihre Auswirkung auf die Hochofenströmungen*. Dr. Dissertation, RWTH Aachen, 1987.
8. ASSIS, P.S., MINELLI, R.F. *Injeção de materiais pulverizados em altos-fornos*. In: Curso sobre Alto-forno. Ouro Preto: ABM, 1993.
9. RUDACK, M.S. *Einblasen von Kohle mit Zuschlagstoffen in den Hochofen*. Dr. Dissertation, RWTH Aachen, 1994.

Artigo recebido em 08/04/2003 e  
aprovado em 17/12/2003.

**Assinar e publicar na REM  
é uma decisão inteligente.**

\*\*\*\*\*

**REM**

**68 anos divulgando CIÊNCIA**

\*\*\*\*\*