

# INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO CARVÃO VEGETAL PULVERIZADO PARA SUA INJEÇÃO ATRAVÉS DAS VENTANEIRAS EM ALTO-FORNO DE PEQUENO PORTE <sup>1</sup>

Carlos Frederico Campos de Assis <sup>2</sup>

Luis Henrique Torres Dantas <sup>3</sup>

Eric Rafael dos Reis <sup>3</sup>

Paulo Santos Assis <sup>4</sup>

## Resumo

O Brasil produz cerca de 35% do ferro gusa através de altos-fornos a carvão vegetal de pequeno porte (volume útil < 300m<sup>3</sup>), gerando com isto resíduo, entre eles carvão vegetal fino (moinha). Este artigo estuda o reaproveitamento da moinha usada em ICP (Injeção de Carvão Pulverizado). O foco principal é o comportamento do carvão vegetal pulverizado injetado, através das ventaneiras, na zona de combustão destes altos-fornos. Utilizou-se para isto um equipamento de simulação, levando em consideração as peculiaridades destes reatores. Dentro deste contexto, características físicas como porosidade, granulometria e superfície específica são correlacionadas com índice de combustão e taxa de injeção. Concluiu-se que parâmetros físicos não são limitantes ao aumento da taxa de injeção, dentro da faixa estabelecida como ideal por vários autores. Aumentos na granulometria podem ser favoráveis sob o ponto de vista econômico para a prática de injeção de carvão vegetal em pequenos altos-fornos.

**Palavras-chave:** Carvão vegetal; Injeção de carvão pulverizado; Granulometria

## EFFECT OF PHYSICAL PROPERTIES OF PULVERIZED CHARCOAL ON THE INJECTION THROUGH THE TUYERES INTO SMALL BLAST FURNACES

### Abstract

Brazil produces ca of 35 % of hot metal directly from charcoal blast furnaces with low internal volume < 300 m<sup>3</sup>. This production generates a waste, charcoal fines that can be used directly into Powder charcoal injection system. The main point of this paper is to study the behavior of this powder injected into the tuyeres of blast furnaces. It was used a simulator, considering the conditions into the tuyeres. In this context, physical characteristics like porosity, grain size distribution, specific surface were correlated with the combustion index and charcoal injection rate. It was concluded that physical parameters are not limitant to higher charcoal injection rate, when the value are in the values supported by authors, it was concluded that the charcoal grain size can be increased till 0,162 mm without giving no problem to its combustion

**Key words:** Charcoal; Powder coal injection; Grain size distribution.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

<sup>2</sup> *Membro da ABM, M.Sc. Engenheiro Metalurgista da Escola de Minas – UFOP. Doutorando da REDEMAT*

<sup>3</sup> *Membro da ABM, Graduando em Engenharia Metalúrgica pela Escola de Minas – UFOP*

<sup>4</sup> *Membro da ABM, Mestre em Engenharia de Materiais pela REDEMAT. Doutorando da REDEMAT*

## 1 INTRODUÇÃO

Este artigo foi retirado de uma dissertação de mestrado defendida, por um dos autores, recentemente na REDEMAT. Este trabalho tinha como finalidade incentivar as empresas produtoras independentes de gusa que não possuem a tecnologia de injeção de carvão pulverizado em seus altos-fornos e ajudar a alavancar de vez os desenvolvimentos daquelas que já estão praticando, alcançando com isto maior competitividade no mercado mundial.

No Brasil o ferro gusa é produzido por duas rotas, a de alto-forno a coque e carvão vegetal. No caso do carvão vegetal pode ser dividida em usinas integradas, que produzem aço como produto final, e as não-integradas que produzem ferro gusa. Estas são chamadas de produtores independentes de gusa. A Tabela 1 mostra a distribuição de produção de ferro nos três setores, nos últimos 5 anos. No Brasil, existe uma unidade de redução direta, que produz ferro-esponja que normalmente pode ser usado em aciarias elétricas, substituindo parte da sucata nos mesmos.

**Tabela 1** – Produção total de ferro-gusa no Brasil (Unidade: Milhões de toneladas).<sup>(1)</sup>

Ano	Carvão Vegetal		Coque	Total
	Usinas Integradas	Produtores Independentes	Usinas Integradas	
2002	1,29	6,75	21,59	29,64
2003	1,34	8,10	22,56	32,01
2004	1,44	10,08	23,22	34,76
2005	1,64	9,77	22,46	33,88
2006	1,70	9,46	21,27	32,45

Destes produtores independentes de gusa, a maioria não possui ICP (Injeção de Carvão Pulverizado) em seus altos-fornos como pode ser visto na Tabela 2. Dados industriais mostram que a injeção de carvão vegetal pulverizado em pequenos altos-fornos a carvão vegetal está em torno de 80kg/t gusa<sup>(2)</sup> enquanto no mundo se pratica valores acima de 150kg/t gusa (Figura 1). Portanto, existe um hiato muito grande entre o setor independente de gusa (PIG) e o que se pratica no mundo para tornar a aplicação desta tecnologia ou técnica, economicamente viável para este setor tão importante para o país.

A moagem do carvão para sua injeção em alto-forno apresenta hoje um das operações de maior custo nas instalações de ICP. Alguns autores e empresa utilizam do conceito que o carvão pulverizado para injeção deve ter granulometria de 80% abaixo de 200 mesh<sup>(1)</sup>. Um dos princípios fundamentais da ICP é que o carvão injetado deve ser queimado na zona de combustão (raceway). Todavia, quando esta queima não acontece de forma completa, ocorrem problemas como diminuição de permeabilidade, pois o carvão pulverizado formará uma camada em torno da zona de combustão (*bird's nest*) ou alojará no interstício da carga do alto-forno.<sup>(2)</sup> A Figura 2 ilustra este fenômeno.

Tabela 2 - Altos-fornos, de pequeno porte, a carvão vegetal no Brasil com ICP, 2007. <sup>(3)</sup>

	Total de Empresas	Total de AF	Total de Empresa com ICP	Total de AF com ICP
Quantidade	83	153	8	22

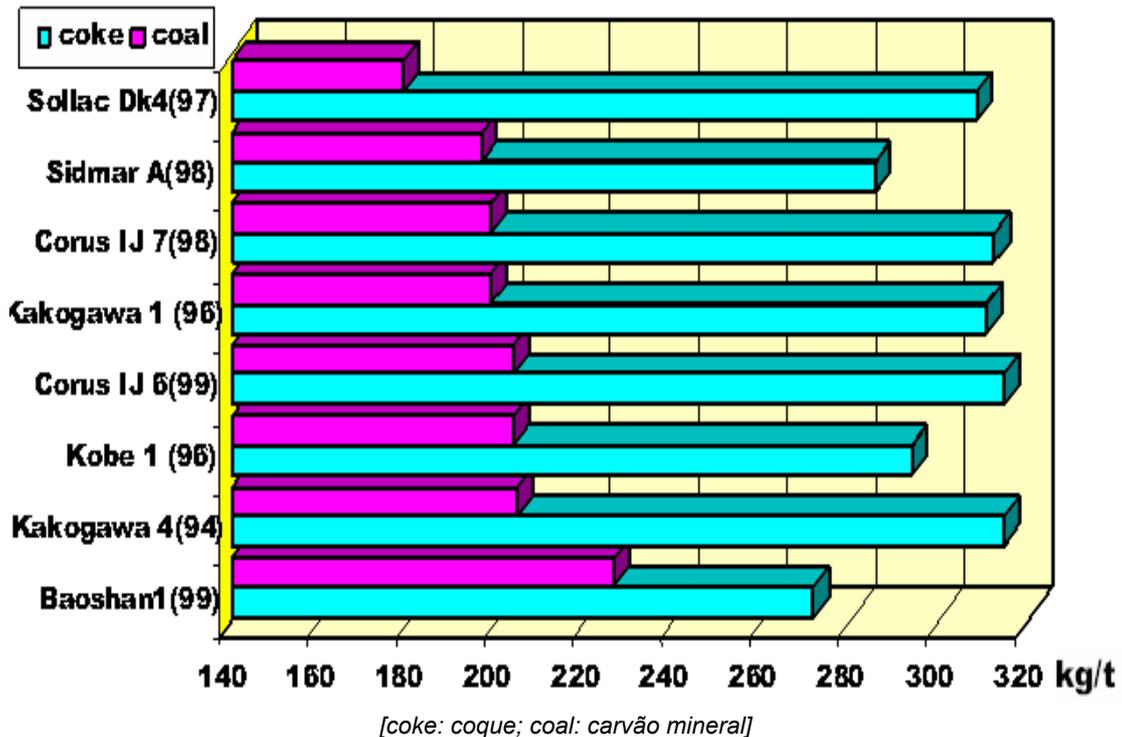
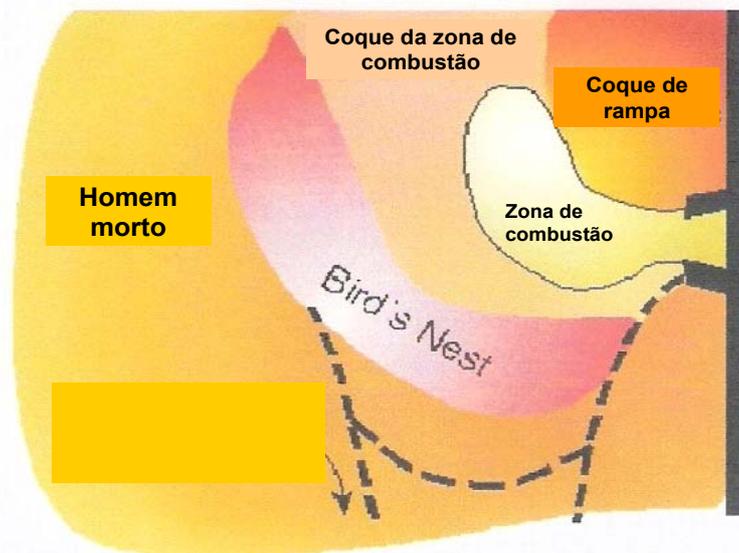
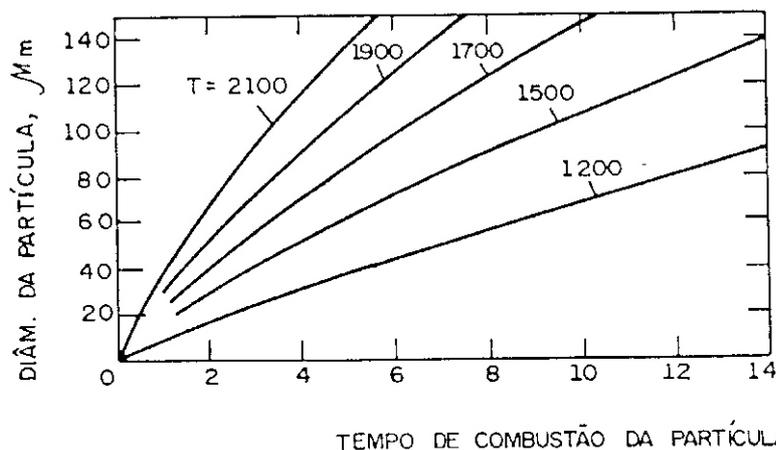


Figura 1 – Taxas de injeção de carvão mineral em alguns altos-fornos a coque. <sup>(4)</sup>

A queima do carvão pulverizado na zona de combustão está ligada a dois fatores importantes; quantidade de oxigênio disponível para a reação de combustão e granulometria. Neste caso, a Figura 3 mostra a dependência do diâmetro da partícula com a velocidade de combustão, ou seja, quanto menor o valor da primeira maior a velocidade de combustão. Isto é importante, pois, o tempo de permanência da partícula de carvão na *raceway* é variável de 20 ms a 50 ms. <sup>(4)</sup>



**Figura 2** – Esquema representativo de estrutura de coque no nível das ventaneiras do alto-forno.<sup>(5)</sup>



**Figura 3** – Influência do diâmetro da partícula de carvão pulverizado sobre o tempo total de combustão para diferentes temperaturas da fase gasosa.<sup>(5)</sup>

Propriedades como porosidade e superfície específica podem contribuir com a eficiência de combustão do carvão pulverizado, ou seja, aumento do índice de combustão. Isto acontece devido ao maior contato entre oxigênio e a partícula de carvão aumentando a cinética de reação de combustão.<sup>(6-9)</sup>

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

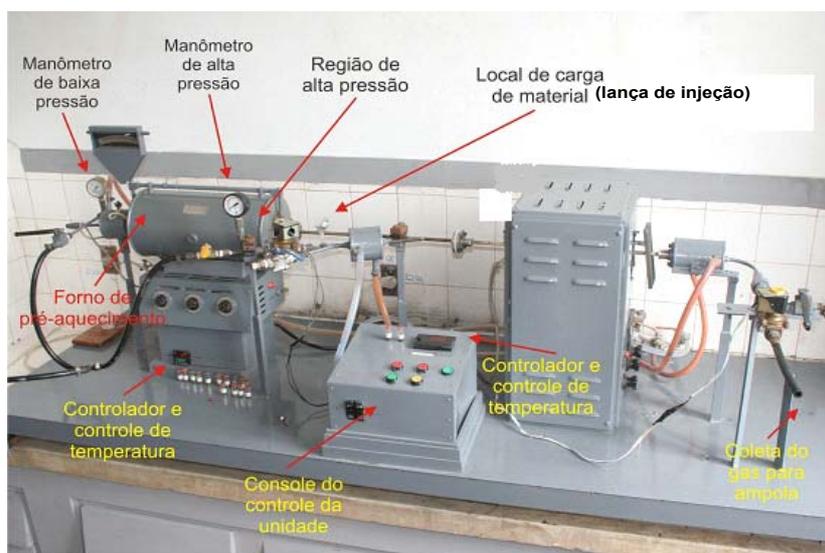
As amostragens foram feitas após o sistema de moagem, secagem e misturas de carvões vegetais do ICP, ou seja, não levou em consideração a sua procedência. A norma NBR6923 (Carvão vegetal – Amostragem e preparação de amostra, de 1981) da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) foi utilizada para proceder às amostragens. Estas foram quarteadas e separadas na quantidade de 150 g por amostra. As amostras foram identificadas, levando em consideração sua análise química imediata (C1, C2 e C3), granulométrica (G1, G2 e G3), umidade (U1, U2 e U3) e fonte (AP) Elas foram armazenadas em recipientes plásticos devidamente preparados e identificados para recebê-las.

Para determinar a granulometria média, a norma utilizada é a ABNT NBR7402 (Carvão vegetal – Análise granulométrica, de 1982). Por outro lado, usou-se a norma

ABNT NBR8112 (Carvão vegetal – Análise imediata, de 1986) para a determinação da análise imediata, em base seca.

A utilização do BET (o nome deriva das iniciais dos nomes dos cientistas que a propuseram: Brunauer, Emmet & Teller), que é um método para determinar a porosidade de grãos, proporcionou a determinação de várias propriedades físicas. Destaque para, superfície específica, volume total de poros e volume de microporos das amostras.

A análise do índice de combustão foi através de um simulador de combustão, o qual simula as condições peculiares da zona de combustão. A temperatura de sopro foi mantida constante em 800°C e a temperatura de gás na zona de alta temperatura foi controlada em 1.200°C. A taxa de injeção variou de 60 kg/t gusa, 100 kg/t gusa e 120kg/t gusa. Na Figura 4 pode ser visto o simulador de ICP.



**Figura 4** – Equipamento utilizado para simular a injeção de carvão pulverizado em alto-forno; disponível no Laboratório de Siderurgia, da Escola de Minas.<sup>(8)</sup>

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da caracterização química e granulométrica das amostras estão representados na Tabela 3.

**Tabela 3** – Representação da análise química e granulométrica do carvão vegetal caracterizado.

Amostra	Análise imediata; base seca				Análise elementar				Granulometria média (mm)
	Cf (%)	TU (%)	MV (%)	CZ (%)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	
<b>C1</b>	54,8	1,4	24,2	21,0					0,070
<b>C2</b>	59,6	1,4	24,6	15,8					0,072
<b>C3</b>	65,3	1,4	24,1	10,6					0,068
<b>U1</b>	59,6	1,1	24,6	15,8					0,070
<b>U2</b>	59,6	2,9	24,6	15,8					0,072
<b>U3</b>	59,6	4,8	24,6	15,8					0,070
<b>G1</b>	60,1	1,5	24,4	15,5					0,070
<b>G2</b>	59,8	1,5	24,3	15,9					0,119
<b>G3</b>	60,9	1,5	24,4	14,7					0,162
<b>AP</b>	60,1	1,6	24,2	15,7	66,67	2,54	0,81	29,98	0,073

Os resultados do ensaio de BET estão representados na Tabela 4

**Tabela 4** – Resultados de parâmetros de porosidade e densidade real de carvão vegetal.

Amostra	Superfície Específica	Volume total de poros	Volume de microporo* ( $\theta_m < 2\eta m$ )	Área dos microporo*	Diâmetro médio de poros	Tamanho máximo de poros	Densidade
Unidade	m <sup>2</sup> /g	10 <sup>2</sup> cm <sup>3</sup> /g	x10 <sup>-3</sup> cm <sup>3</sup> /g	m <sup>2</sup> /g	Å	Å	g/cm <sup>3</sup>
<b>C1</b>	1,861	0,5804	0,7991	2,262	120,48	2918,6	1,512
<b>C2</b>	1,729	0,6945	0,7995	2,264	160,07	1342,8	1,504
<b>G1</b>	1,367	0,1143	0,7453	2,110	330,44	1795,4	1,597
<b>G3</b>	2,171	1,086	1,0119	2,885	200,00	1466,8	1,539
<b>AP</b>	2,442	1,102	1,057	2,993	180,05	2278,1	1,555

\* Classificação de microporo é por diâmetro ( $\theta_m < 2\eta m$ ) de poro e macroporo ( $\theta_m > 50\eta m$ ) segundo a IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry).

A Tabela 5 mostra os resultados obtidos nos ensaios de combustão através do simulador.

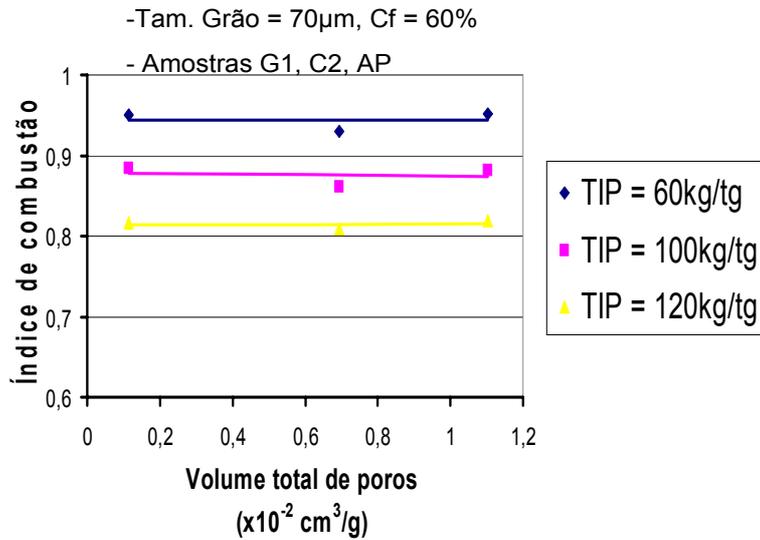
**Tabela 5** – Resultados dos ensaios de combustão com elevado gradiente térmico; temperatura de sopro constante de 800°C.

Amostra	Origem (Análise)	Taxa de Injeção (kg/t gusa)	Índice de combustão (IC)
<b>C2</b>	59,6% Cf	60	0,930
		100	0,861
		120	0,809
<b>G1</b>	70 $\mu m$	60	0,950
		100	0,884
		120	0,816
<b>G2</b>	119 $\mu m$	60	0,949
		100	0,882
		120	0,820
<b>G3</b>	162 $\mu m$	60	0,946
		100	0,872
		120	0,806
<b>AP</b>	73 $\mu m$	60	0,952
		100	0,882
		120	0,819

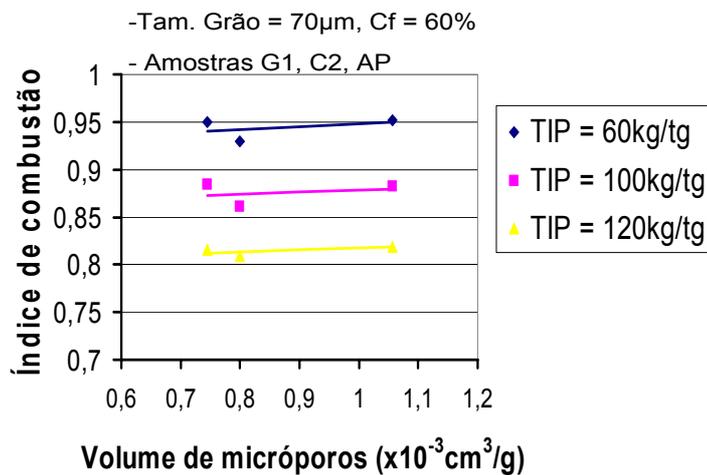
As Figuras 5 a 7 representam as relações de parâmetros do carvão analisado no BET, com o índice de combustibilidade e taxa de injeção, mantendo constante o carbono fixo e granulometria. Observou-se que não houve variações significativas dos IC e TIP com esses parâmetros característicos do carvão vegetal.

A Figura 5 representa a relação entre volume total de poros com o taxa combustão, mostrando uma pequena variação de IC com as variações dos volumes de poros. Neste caso, é correto dizer que os poros não tiveram grande influência na melhoria da combustibilidade. Isto pode ser verificado nas outras Figuras 6 e 7. Importante salientar que na Figura 7 tem-se a relação da superfície específica com o índice de

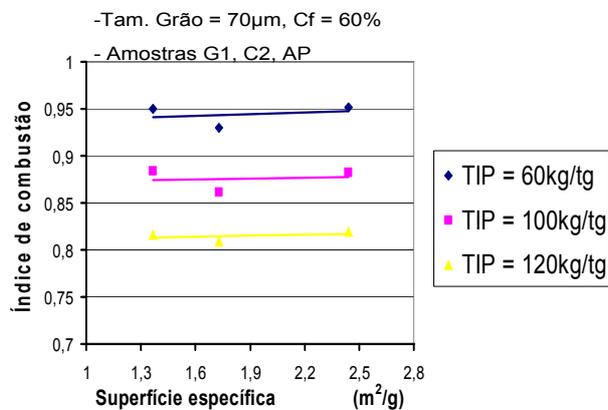
combustão, neste caso como o granulometria é constante, o aumento da superfície específica está relacionado com o aumento da porosidade.



**Figura 5** – Relação entre volume total de poros e índice de combustão, variando a taxa de injeção.

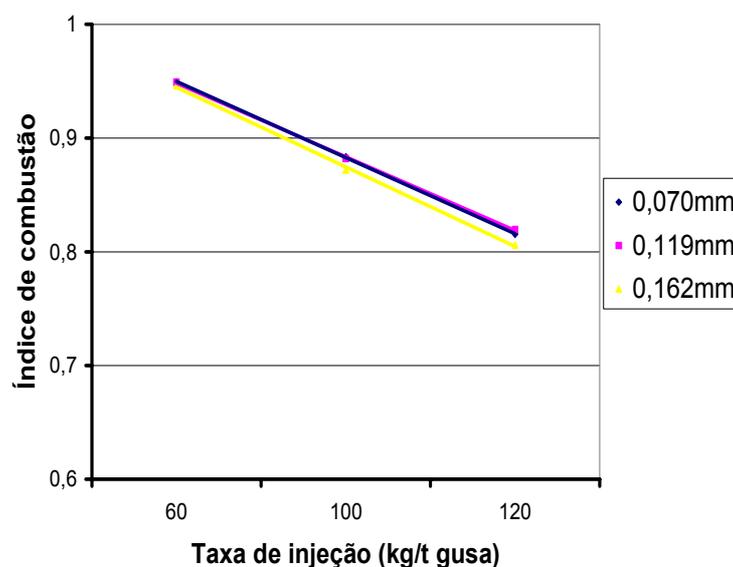


**Figura 6** – Relação entre volume de microporos e índice de combustão, variando a taxa de injeção.



**Figura 7** – Relação entre superfície específica e índice de combustão, variando a taxa de injeção.

No caso da Figura 8, observa-se que um aumento de granulometria implicou uma leve diminuição do índice de combustão, para uma mesma taxa de injeção de carvão pulverizado. Economicamente isto pode ser sensível durante a etapa de moagem do carvão vegetal, pois passar a granulometria de 162  $\mu\text{m}$  para 70  $\mu\text{m}$  é de alto custo e sem melhoria de combustibilidade. Isto mostra que ao se trabalhar com granulometria média acima do estabelecido por muitos autores (80% < 74  $\mu\text{m}$ ) pode ser viável, nas condições obtidas desta contribuição, merecendo uma avaliação específica mais detalhada para cada caso.



**Figura 8** – Relação entre taxa de injeção e índice de combustão, variando granulometria e a taxa de injeção.

Fica claro, portanto que o efeito marcante que influencia diretamente no índice de combustão está relacionado à reação química (ou seja relação O/C) e não a fatores físicos, demonstrando que a moagem do carvão vegetal não precisaria ficar restrita a valores estreitos definidos pela prática industrial ( 80 % < 200 mesh), certamente implicando em elevação de custos de moagem e sem ganhos na combustibilidade do carvão vegetal no raceway. Novamente, cabe aqui a observação supra-citada que é sempre avaliar o alto-forno e o sistema de pulverização da usina de tal sorte a poder auferir melhores resultados técnicos e econômicos do sistema.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados preliminares usando equipamentos de laboratório de Siderurgia da Escola de Minas-UFOP e as condições dinâmicas reinantes em um alto-forno a carvão vegetal de pequeno porte, permitem concluir:

- é possível injetar até 120 kg por tonelada de gusa em pequenos altos-fornos a carvão vegetal, em granulometrias de até 162  $\mu\text{m}$ .
- não existe ganho sensível em termos de combustibilidade quando se altera a granulometria do carvão vegetal de 70 para 162  $\mu\text{m}$ .
- ganhos marginais com a adoção da técnica de injeção de carvão vegetal pulverizado de maior tamanho podem ser obtidos em pequenos altos-fornos: quais sejam redução no custo de moagem, elevação da taxa de injeção de carvão

pulverizado, sem qualquer ônus na zona de combustão, além de se ter uma maior produtividade do moinho de carvão vegetal.

- os fenômenos químicos são os responsáveis pelas mudanças propostas a granulometrias de carvão vegetal injetado em altos-fornos a carvão vegetal, e tem em suas características físicas a sua explicação convincente no tocante a combustibilidade do carvão vegetal.

## Agradecimentos

Os autores expressam os agradecimentos a Calsete, Solvi e UFOP que nos apoiaram na presente pesquisa. Ao CNPq e FAPEMIG que apóiam as pesquisas do professor nesta área, bem como a FAPEMIG, UFOP e FG pelo apoio a participação dos alunos e professor no congresso anual da ABM.

## REFERÊNCIAS

- 1 Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais. Disponível em: <http://www.showsite.com.br/silviminas/html/index.asp?Metodo=ExibirLista&Grupo=4%20&SubGrupo=32> [acesso em 15 jan 2008].
- 2 Assis, P.S. Contatos pessoais com técnicos dos PIG e setor a coque, em setembro de 2006, seminário nacional realizado em Ouro Preto, organizado pela ABM.
- 3 Clyde Materials Handling, 2007 & site Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais (SINDIFER), endereço eletrônico [http://www.sindifer.com.br/Anuario\\_2007.html](http://www.sindifer.com.br/Anuario_2007.html), no dia 15/01/2007.
- 4 Assis, P. S. et alli. *Curso de injeção de materiais pulverizados em altos-fornos*. Livro publicado pela ABM, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006, 292p.
- 5 Stainlay, R., Bennett, P. *PCI Coal – Status and Forecast*. 1° International Meeting on Ironmaking – ABM - 24 a 26 de setembro de 2001, Belo Horizonte - M.G. V. 1, p.24-34.
- 6 Braga, R. N. B. et alli. *Carvão Vegetal, Produção, Propriedades e Aplicações na Siderurgia*. Livro publicado pela ABM, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1992, 320p.
- 7 Castro, L. F. A. *The Mini Blast Furnace – A Challenge for a New Ironmaking*.
- 8 1° International Meeting on Ironmaking – ABM - 24 a 26 de setembro de 2001, Belo Horizonte-M.G. V. 1, p. 485 – 494.
- 9 Assis, P. S., Martins, W. B., Vieira, C. B. *Avanços na Injeção de Carvão Pulverizado para a sua Aplicação em Altos-Fornos*. REM, Revista Escola de Minas, v. 56, n. 4, Ouro Preto Oct./Dec. 2003, 9p.
- 10 Barroso, R. C., Peres, A. E. C., Montenegro, L. C. M., Galery, R. *Caracterização Tecnológica dos Finos de Carvão Vegetal*. XXXV Seminário e Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e VI Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, 30 de agosto a 2 de setembro de 2005, Florianópolis-SC. Anais V. 1, p. 284 - 293.