

AVALIAÇÃO DA COMBUSTIBILIDADE DOS FINOS DE COQUE DE DESPOEIRAMENTO DA GERDAU VISANDO A INJEÇÃO EM ALTO-FORNO*

Hárley Philippe Santos da Silva¹
Guilherme Liziero Ruggio da Silva²
Júnio Augusto Rodrigues Pasqual³
Paulo Santos Assis⁴

Resumo

A tecnologia de injeção de carvão pulverizado (ICP) nas ventaneiras dos altos-fornos é consolidada mundialmente para diminuir o consumo de coque para a produção de ferro-gusa. 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. A injeção de carvão pulverizado permite utilizar misturas de carvões com diferentes características, possibilitando reduções no custo de produção do ferro-gusa. Um carvão para injeção precisa queimar rapidamente para minimizar a formação de carvão não queimado, material que prejudica a permeabilidade do alto-forno (AF). Devido à necessidade contínua que as siderúrgicas têm de reduzir os custos de produção, o reaproveitamento de resíduos industriais é uma tendência crescente no segmento. Nesse contexto, o presente trabalho avaliou a combustibilidade dos finos de coque provenientes do despoeiramento do beneficiamento de coque da Gerdau Ouro Branco, visando à injeção em AF. O material possuía granulometria abaixo de 90µm, usualmente praticada em ICP. Os ensaios de combustibilidade foram realizados com o material em proporção única e, em misturas de diferentes proporções mássicas com carvões minerais. A combustibilidade dos carvões e dos finos de coque foi avaliada e mostrou que os finos de coque provenientes do despoeiramento do beneficiamento de coque possuem boa combustibilidade e podem ser injetados em alto-forno.

Palavras-chave: ICP; Carvão pulverizado; Finos de coque; Reaproveitamento de resíduos industriais.

COMBUSTIBILITY EVALUATION OF GERDAU'S COKE POWDER FOCUSING INJECTION IN BLAST FURNACE

Abstract

The PCI technology (*Pulverized Coal Injection*) through tuyeres of blast furnaces is worldwide solidified to reduce the coke used to produce hot metal. Nowadays, more than 400 blast furnaces use this technology and more than 70% all blast furnaces in the world use some kind of solid materials injection. The pulverized coal injection allows using mixes of coal in different characters, allowing reduce the production costs of hot metal. A coal for injection needs burning fast to reduce the char formation (coal not burned), material that injures the blast furnace permeability. How steel plants should reduce constantly the production costs, reuse rests is an increasing trend at siderurgical segment. In this context, this work evaluated the combustibility of coke powder proceeded from dust removal of Gerdau's coke processing with focus to inject in blast furnace. The coke powder analysed was under than 90µm, usually used in PCI. The combustibility tests were made with the material alone and mixed with other mineral coals in different rates. The combustibility of coals and coke powder was evaluated and showed that coke powder proceed from dust removal has good combustibility and can be used to inject in blast furnace.

Keywords: PCI; Pulverized coal; Coke powder; Reusing industrial rest.

¹ Graduado em Engenharia Metalúrgica, Estudante de Mestrado – FIMAT/UFOP, MG, Brasil.

² Mestre em Engenharia de Materiais, Estudante de Doutorado – REDEMAT/UFOP, MG, Brasil.

³ Estudante de Graduação, Engenharia Metalúrgica, UFOP, MG, Brasil.

⁴ Doutor em Engenharia Metalúrgica, Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica, UFOP e Redemat. Ouro Preto, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O processo de Injeção de Carvão Pulverizado, que será referido como ICP (em inglês, PCI = *Pulverized Coal Injection*), consiste na injeção de combustíveis auxiliares nas ventaneiras do alto-forno para minimizar o consumo de combustíveis fósseis e aumentar a eficiência de combustão. Este processo traz benefícios de ordem econômica, técnica e ambiental para a siderurgia, um dos setores da indústria que responde pelas maiores emissões de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera. O ICP é um processo bastante flexível quanto ao tipo de combustível injetado e atualmente é praticado na maioria dos altos-fornos existentes. No Brasil, todo o carvão empregado na siderurgia, ou seja, para coqueificação e injeção em alto-forno, é importado, o que acaba por encarecer os custos do ferro-gusa.

Uma tendência crescente no setor siderúrgico é a utilização de misturas com o objetivo de alcançar um desempenho global mais eficiente do que o alcançado pelo uso de carvões individuais. Além disso, a conscientização ambiental da necessidade de se reduzir as emissões de CO₂ tem levado à busca pela substituição, mesmo que parcial, de combustíveis fósseis por outras fontes de energia.

Nesse contexto, o presente trabalho avalia a combustibilidade dos finos de coque do despoeiramento da Gerdau Ouro Branco, objetivando a injeção em alto-forno.

A proposta do estudo é apresentar um material alternativo que possa ser utilizado como combustível pulverizado nos altos-fornos, visando proporcionar benefícios econômicos para a Empresa.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada a esse projeto constituiu na utilização de um aparelho simulador de injeção de materiais pulverizados em fornos e um equipamento (marca Quantachrome, modelo NOVA 1000) para análise de porosidade e densidade superficial.

2.1 Matérias-primas Utilizadas

As matérias-primas (MP's) utilizadas podem ser vistas na Figura 1. São elas:

- Finos de coque (identificados como BFC) provenientes do sistema de despoeiramento do beneficiamento de coque da Gerdau Ouro Branco;
- Carvões minerais de diferentes procedências.

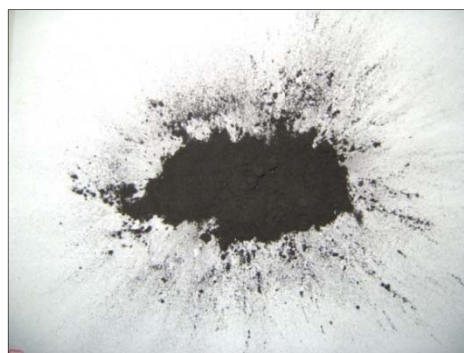


Figura 1. Mistura entre finos de coque e carvões minerais (<90 µm)

Para caracterização das MP's, foram consideradas as principais variáveis que influenciam no poder energético de um combustível pulverizado e na qualidade

química do ferro-gusa. Portanto, foram realizadas análises química (imediata e elementar), física (porosidade e densidade) e granulométrica dos materiais.

2.1.1 Análise química imediata

A análise imediata realizada nos materiais está descrita na Tabela 1.

Tabela 1. Valores médios de análise imediata e granulométrica dos materiais utilizados

Material	Análise Imediata (%)					PCI (kcal/kg)	Granulometria < 90 µm (%)
	C _{fixo}	Cinzas	MV	Enxofre	Umidade		
Carvão ICP	66,35	9,23	24,43	6,24	1,72	7286	99,99
Finos de coque	75,23	18,63	6,14	3,34	0,82	7354	99,99

PCI: Poder calorífico inferior.

- Os finos de coque possuem teor acentuado de cinza, fato que contribui para a geração de escória e aumento do consumo de combustível no alto-forno, porém é um fator que pode ser contrabalanceado através da composição das demais matérias-primas carregadas no alto-forno ou adequações na operação do mesmo.

2.1.2 Análise química elementar

A análise elementar está descrita na Tabela 2.

Tabela 2. Valores da análise elementar dos materiais utilizados

Material	Fe ₂ O ₃	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO ₂	Mn total	P ₂ O ₅	P	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	S
Carvão A	6,12	4,28	53	24,5	8	1,56	0,08	0,05	0,37	0,16	1,02	1,21	0,75	3,16
Carvão B	7,33	5,92	62,47	23,76	1,29	0,68	0,02	0,11	0,16	0,04	0,46	1,28	0,63	11,07
Carvão C	4,17	2,92	55	30,7	2,03	0,85	0,05	0,03	0,7	0,31	1,75	1,04	1,1	4,1
Mistura Base	5,9	4,4	56,97	26,29	3,68	1,02	0,05	0,07	0,41	0,17	1,06	1,18	0,82	6,24
Finos de coque	20,95	14,65	51,11	10,18	10,15	2,44	0,03	0,25	0,27	0,12	0,36	0,74	0,63	3,34

- Os finos de coque possuíam elevado teor de Fe₂O₃ devido presença de poeira de minério de ferro no local de captação dos particulados.
- A concentração de S, Mn e P dos finos de coque é bem próxima dos carvões minerais comumente utilizados, o que não influenciaria na qualidade química do ferro-gusa.
- A concentração de álcalis (Na₂O e K₂O) dos finos de coque é inferior a dos carvões comumente utilizados, o que não prejudicaria a operação do alto-forno.

2.1.3 Mistura dos carvões minerais

Os carvões minerais foram misturados em diferentes proporções mássicas a fim de se obter uma mistura ótima de injeção (melhor relação custo-benefício). Neste trabalho, será referida como Mistura Base (MB). Os carvões utilizados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Composição da Mistura Base

Composição da Mistura Base	
Carvão	Característica
A	Baixo volátil
B	Baixo volátil
C	Alto volátil

2.2 Ensaio de Combustão

Para realizar a combustão dos materiais, utilizou-se o aparelho de injeção de materiais pulverizados de propriedade da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), o qual é capaz de simular as condições de trabalho de um alto-forno. O forno do simulador é capaz de operar em temperaturas acima de 1500°C. A Figura 2 mostra o referido equipamento.

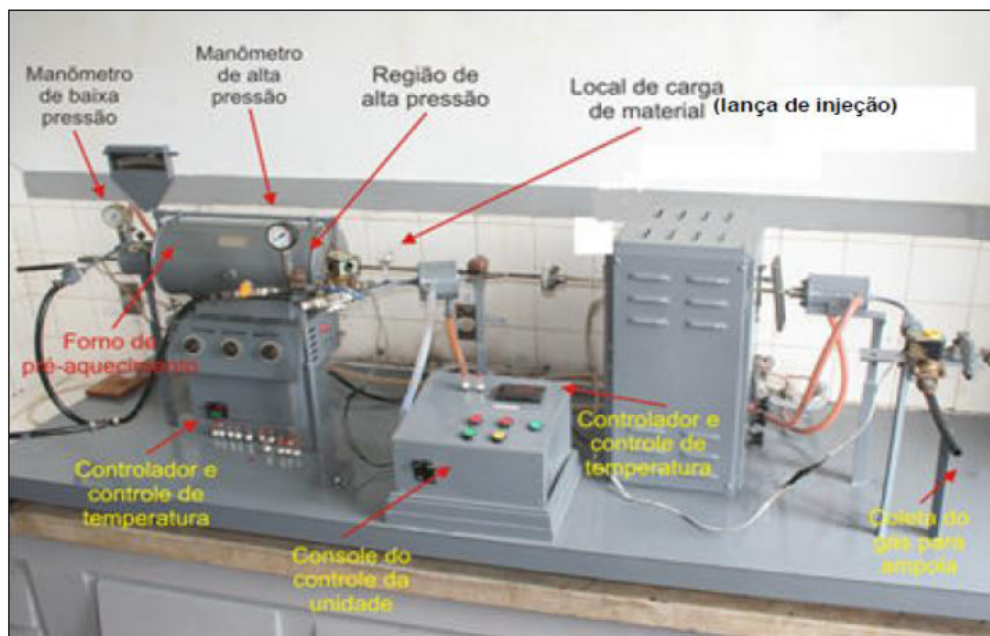


Figura 2. Simulador de injeção de materiais pulverizados. Fonte: (ASSIS, 2008).

De forma resumida, pode-se dizer que o aparelho é composto pelo forno de pré-aquecimento que simula as condições do regenerador de calor de um alto-forno, o ponto de injeção de carvão e o forno de combustão que simula a zona de combustão ou "raceway zone". Dessa forma, o equipamento representa as condições físicas de operação e combustão de carvão em um alto-forno. A Figura 3 mostra o equipamento de forma esquemática.

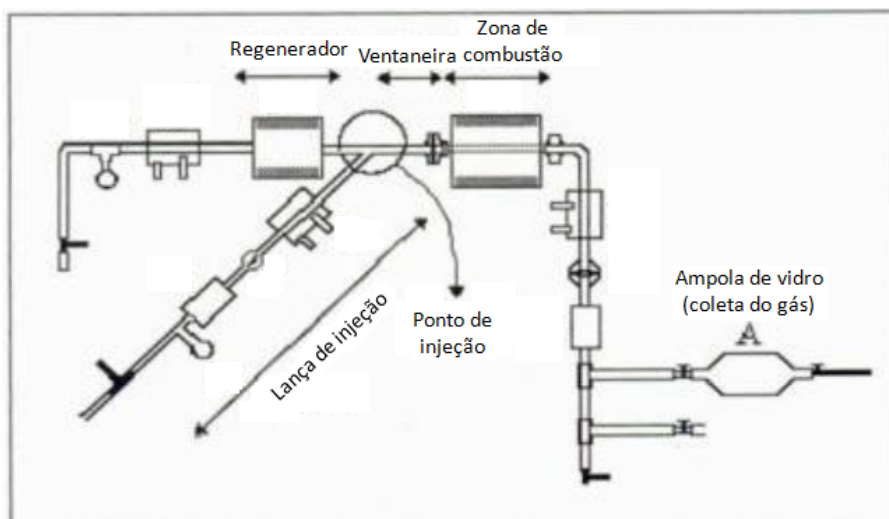


Figura 3. Desenho esquemático das regiões do Simulador. Fonte: (ASSIS, 2008)

Após a injeção do carvão pulverizado no forno, o gás produzido é coletado em uma ampola de vidro e analisado para o cálculo do índice de combustão, o qual é representado abaixo.

$$IC = k * (\%CO + \%CO_2) * n / [(ma * \%C_f / 1200000) - (\%CH_4 * ng / 100)]$$

Em base úmida, onde:

K = função da condição do alto-forno na zona de combustão.

IC = Índice de combustão (combustibilidade);

%CO, %CO₂, %CH₄ = Porcentagens dos gases produzidos;

%C_f = Carbono fixo contido na amostra;

ng = Número de mols do gás depois da experiência;

ma = Massa da amostra de carbono injetada em miligramas.

2.2.1 Combustão dos materiais

As amostras foram pesadas, misturadas e queimadas em diversas proporções conforme descrito na Tabela 4.

Tabela 4. Discriminação dos ensaios de combustão realizados

Ensaio	Componentes da amostra	Proporção (%)	Quantidade (mg)
1	Carvão A	100	120
2	Carvão B	100	120
3	Carvão C	100	120
4	Mistura Base	100	120
5	Finos de Coque	100	120
6	Mistura Base	95	114
	Finos de Coque	5	6
7	Mistura Base	80	96
	Finos de Coque	20	24
8	Mistura Base	50	60
	Finos de Coque	50	60
9	Mistura Base	25	30
	Finos de Coque	75	90

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise de Porosidade

A análise de porosidade está descrita na Tabela 5.

Tabela 5. Análise de porosidade dos materiais utilizados

Nome da Amostra	Superfície Específica BET (m ² /g)	Volume de Microporos (cm ³ /g)	Área de Microporos (m ² /g)	Constante C (faixa ideal de valores: 50<C<200)	Tamanho médio dos Microporos (nm)	Volume Total de Poros (cm ³ /kg)	Diâmetro Médio dos Poros (Å)
Carvão A	3,919	2,0 X 10 ⁻³	5,518	26,13	24,277	8,31 x 10 ⁻³	42,41
Carvão B	3,414	2,0 X 10 ⁻³	4,754	31,80	22,560	5,83 x 10 ⁻³	34,12
Carvão C	3,701	2,0 X 10 ⁻³	5,300	36,70	22,979	9,62 x 10 ⁻³	52,00
Finos de coque	8,771	4,0 X 10 ⁻³	12,522	56,45	20,874	17,4 x 10 ⁻³	39,87

- A Figura 4 representa os valores de tamanho médio e volume dos microporos dos materiais. Pode-se observar que os finos de coque possuem os microporos menores que dos carvões minerais, porém em maior volume. O aumento de porosidade aumenta de forma significativa a combustibilidade do material.

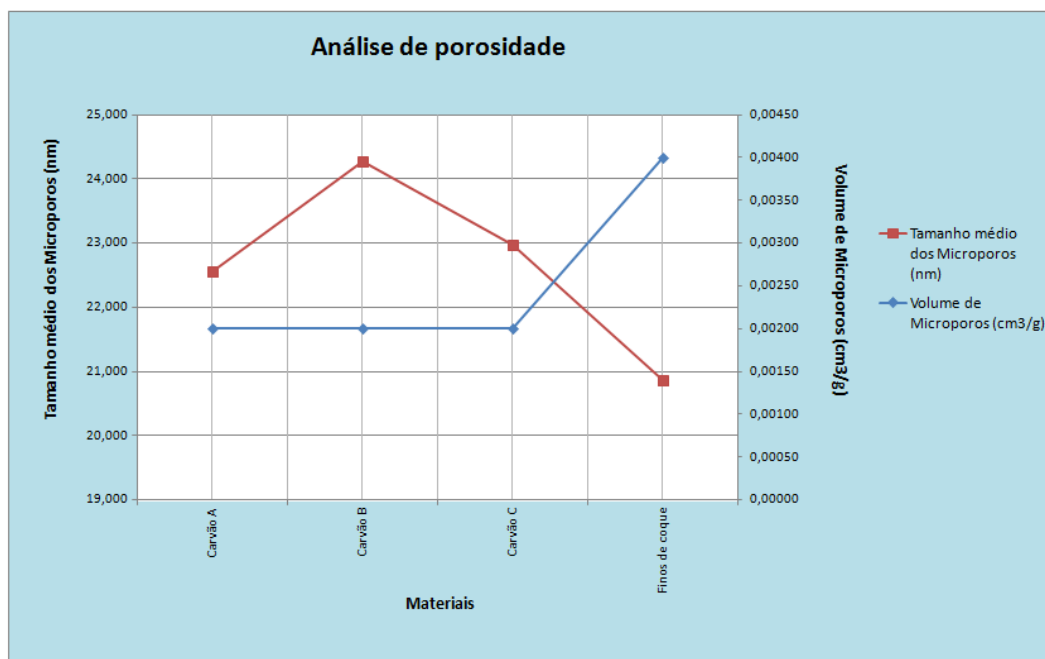


Figura 4. Representação gráfica dos resultados de porosidade

3.2 Análise de Combustibilidade dos Materiais Individuais

Os materiais foram submetidos aos ensaios de combustibilidade para determinação do IC. São eles:

- 1) Carvão A;
- 2) Carvão B;
- 3) Carvão C;
- 4) Mistura Base;
- 5) Finos de coque.

Os resultados de combustibilidade mostram que os finos de coque possuem menor combustibilidade quando comparados aos carvões minerais testados. Tal fato pode

ser explicado por se tratar de um material com baixo teor de matéria volátil (MV), conforme mostrado na Tabela 1. Ainda assim, pode-se dizer que é um valor satisfatório, visto que este atingiu 95,2% do valor da Mistura Base. A Figura 5 representa graficamente as taxas de combustão encontradas.

Os resultados estão relacionados com o índice de combustibilidade da Mistura Base e são representados em percentual do IC da Mistura.

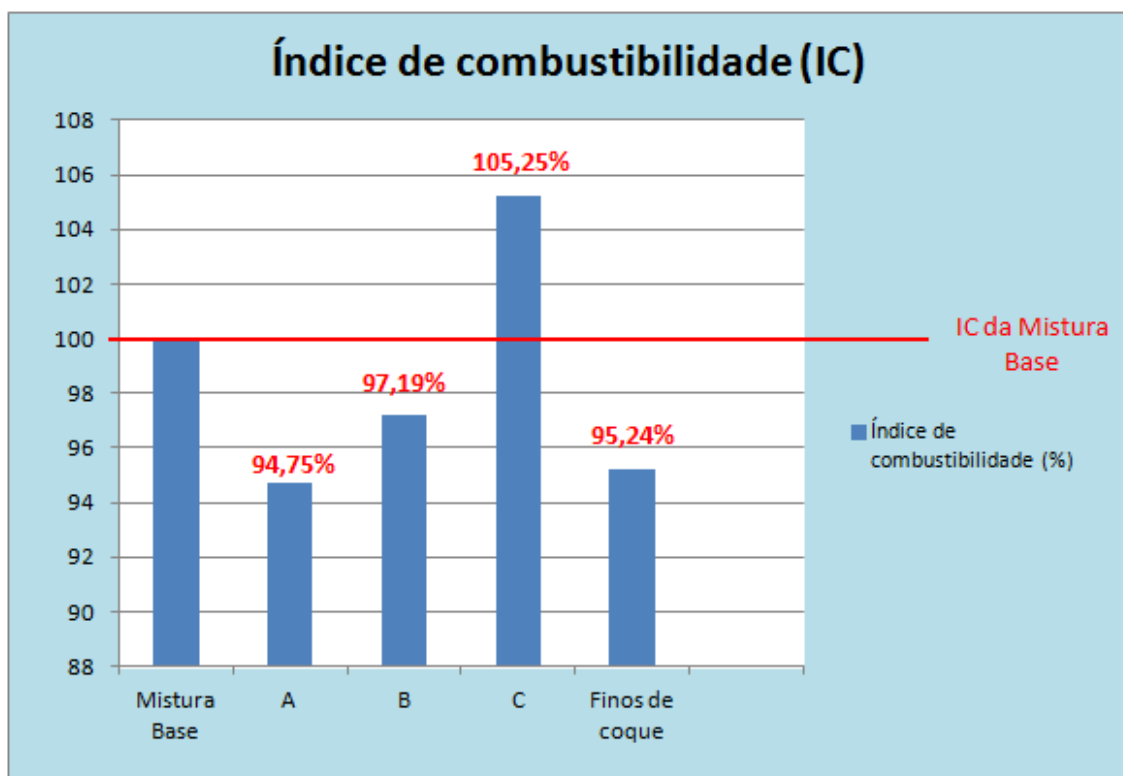


Figura 5. Representação gráfica dos resultados de combustibilidade

3.3 Análise de Combustibilidade das Misturas entre os Finos de Coque e Mistura Base

As taxas de combustão das misturas são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6. Índice de combustão das misturas

Mistura	Taxa de combustão (%)
Mistura Base	100,00
5% Finos de coque	100,73
20% Finos de coque	101,10
50% Finos de coque	100,12
75% Finos de coque	97,44
100% Finos de coque	95,24

A Figura 6 representa graficamente as taxas de combustão das misturas entre a Mistura Base de carvão e os finos de coque.

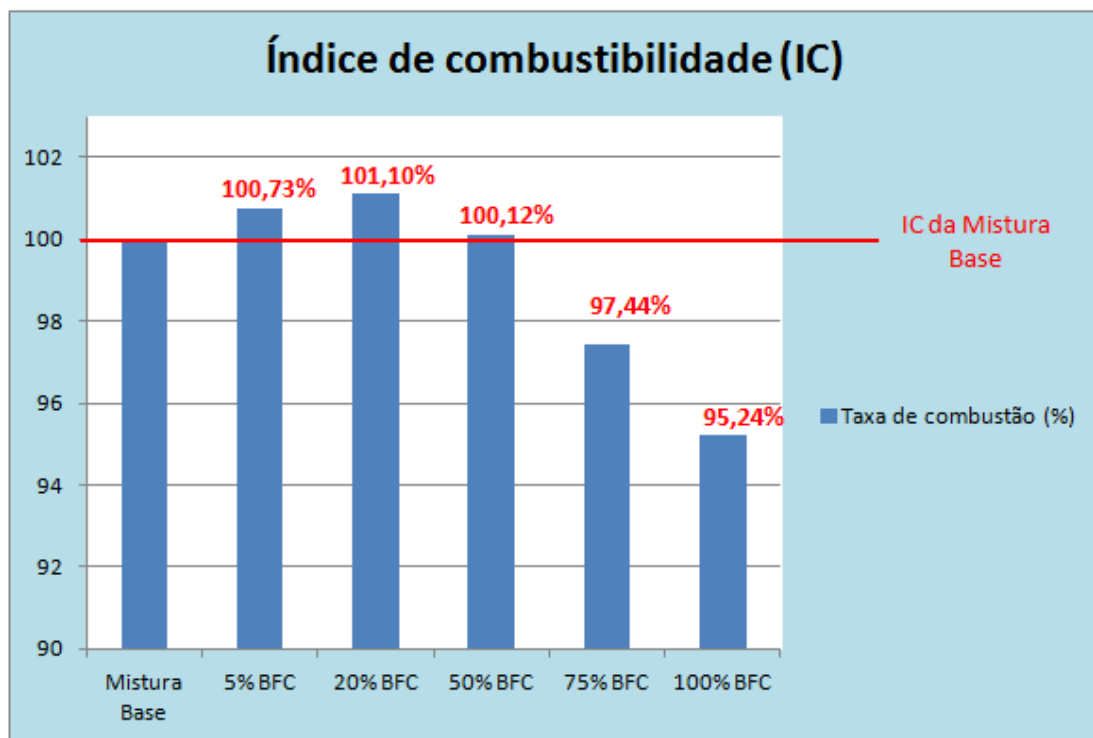


Figura 6. Representação gráfica dos resultados de combustibilidade das misturas

- Nota-se que a combustibilidade da mistura é favorecida quando se adiciona finos de coque até a quantidade de 50% peso. Isso está intimamente ligado à elevada porosidade dos finos de coque em relação aos carvões utilizados.
- Quando a participação do coque na mistura supera 50%, percebe-se queda na combustibilidade. Nota-se então que, a partir de tal quantidade, o baixo teor de voláteis presentes no coque começa a provocar efeito negativo.

4 CONCLUSÃO

Os particulados de coque coletados pelo sistema de despoeiramento podem ser reaproveitados para injeção nas ventaneiras do alto-forno.

Quando os finos de coque são misturados a carvões minerais, obtém-se aumento no índice de combustão da mistura quando a participação destes é inferior a 50%.

A utilização desse resíduo pode contribuir para reduzir o custo de transformação do ferro-gusa sem impactar a qualidade química do mesmo.

BIBLIOGRAFIA

- 1 Assis, C. F. C. Caracterização de Carvão Vegetal para a sua Injeção em Altos-fornos a Carvão Vegetal de Pequeno Porte. 2008, Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.
- 2 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.
- 3 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.
- 4 Barbieri, C. C. T. Estudos de Misturas de Carvões e Biomassa Visando a Combustão em Alto-forno. 2013. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

- 5 Carneiro, R. T. S., Castro, J. B., Giudice, F. D. P. Metodologia de seleção de carvões para injeção em altos-fornos. 2º Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais, ABM, São Paulo, SP, Outubro, 1997.
- 6 Cavaliero, C. K. N., Jannuzzi, G. M. A Injeção de Combustível Auxiliar em Alto-Forno como Medida de Redução das Emissões de CO₂ do Segmento Siderúrgico Nacional: Estudo de Casos na Acesita e Cosipa. XXI Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades da ABM, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Dia 16 a 18 de junho de 1999, Vitória-ES, 11p.
- 7 Machado, J. G. M. S. Estudo da reatividade e combustão de carvões minerais, carvão vegetal e misturas. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.b.
- 8 Macphee, J. A. *et al.* Possible CO₂ mitigation via addition of charcoal to coking coal blends. Fuel Processing Technology, 2009, v. 90, p. 16-20.
- 9 Mourão, M. Introdução à Siderurgia. ABM, São Paulo, 2007.
- 10 Neto, F. B., Neto, J. B. F., Takano, C., Mourão, M. B., Avaliação da Reatividade de Produtos Carbonosos. 61º Congresso Anual da ABM, 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro-RJ, V. 1, p. 9 – 16
- 11 Osório, E., Vilela, A. C. F., Sampaio, C. H., Nota Técnica – Carvão e coque. Estudo prospectivo do setor siderúrgico. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008.
- 12 Silva, M. C., Júnior, R. C., Defendi, G. A., Alves, M. T., Silva, F. D. Filosofia da Aquisição e Utilização de Carvões Para PCI na CST Arcelor Brasil. XXXVI Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e VII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 15 de setembro de 2006, Ouro Preto-M.G. Anais, V. 1, p. 269 - 277..
- 13 Silva, M. C., Júnior, R. C., Defendi, G. A., Alves, M. T., Silva, F. D. Filosofia da Aquisição e Utilização de Carvões Para PCI na CST Arcelor Brasil. XXXVI Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e VII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 15 de setembro de 2006, Ouro Preto-M.G. Anais, V. 1, p. 269 – 277
- 14 Rizzo, E. M. S. Processo de fabricação de ferro-gusa em alto-forno. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2009.