

O SIMULADOR DA ZONA DE COMBUSTÃO DO ALTO-FORNO DO LABORATÓRIO DE SIDERURGIA DA UFRGS – UMA NOVA FERRAMENTA NA SELEÇÃO DE CARVÕES PARA INJEÇÃO

Claudia C. T. BARBIERI¹; André da S. MACHADO²; René L. RECH³; Juliana G. POHLMANN⁴; Eduardo OSÓRIO⁵; Antônio C. F. VILELA⁶

¹PPGE3M-UFRGS – Porto Alegre/RS – Brasil – barbieri.claudia@gmail.com; ²PPGEM-UFGM – Belo Horizonte/MG – Brasil – andremachado@ufmg.br; ³PPGEQ-UFRGS – Porto Alegre/RS – Brasil – renerech@gmail.com; ⁴UFRGS – Porto Alegre/RS – Brasil – juliana.pohlmann@ufrgs.br; ⁵PPGE3M-UFRGS – Porto Alegre/RS – Brasil – eosorio@ufrgs.br; ⁶PPGE3M-UFRGS – Porto Alegre/RS – Brasil – vilela@ufrgs.br

RESUMO

O alto-forno (AF) é a principal rota para a produção de ferro-gusa. Um dos maiores desafios na siderurgia a AF é a redução do consumo de coque. O processo de coqueificação emprega carvões de elevado custo e responde por grande parte das emissões de gases poluentes nas usinas siderúrgicas integradas. Uma estratégia bem-sucedida para a economia de coque é a injeção de combustíveis auxiliares na região das ventaneiras dos AF através do processo denominado PCI (*Pulverized Coal Injection*). A queima do combustível pulverizado gera energia e gases redutores para o minério de ferro. Ao ser injetado, o carvão é submetido na zona de combustão a temperaturas em torno de 2400 K, taxas de aquecimento da ordem de 10^5 a 10^6 K/s e tempo de residência de 10 a 40 ms. Dessa forma a combustão total do carvão, especialmente em altas taxas de injeção, é improvável. É fundamental selecionar carvões para PCI que possuam boa combustibilidade, minimizando assim a geração de sólido residual (char), que pode prejudicar o funcionamento do AF. Existem vários tipos de reatores para a avaliação da combustão de carvão, como termobalanças, fornos de queda livre e simuladores da zona de combustão do AF. Termobalanças são reatores de leito fixo que operam com baixas taxas de aquecimento e fornos de queda livre são mais adequados para a simulação de caldeiras e avaliação de carvões isolados. Por questões operacionais, estratégicas e logísticas as usinas siderúrgicas utilizam para PCI misturas de carvões de características diferentes. Simuladores da zona de combustão do AF são os reatores que se apresentam como a melhor opção para a avaliação de carvões e demais combustíveis para injeção. Nesse contexto, visando a avaliação de combustíveis em condições experimentais mais próximas das encontradas em um AF, o Laboratório de Siderurgia (LaSid) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) projetou e desenvolveu um simulador com características inovadoras, possibilitando a coleta do resíduo sólido, análise quantitativa dos gases de combustão por cromatografia gasosa e aquisição instantânea (da ordem de milissegundos) dos dados termodinâmicos. O presente trabalho tem por objetivos apresentar as principais características do simulador do LaSid-UFRGS e resultados experimentais preliminares.

Palavras-chave: Siderurgia. Alto-forno. Zona de combustão. Combustíveis. Carvão pulverizado.

ABSTRACT

Blast furnace (BF) is the main route for pig iron production. One of the biggest challenges in BF steel industry is the reduction of coke consumption. Cokemaking process employs high cost coals and accounts for the most of polluting gas emissions from integrated steel mills. A successful strategy for saving coke is the injection of auxiliary fuels in tuyere region of BF through PCI (*Pulverized Coal Injection*) process. Fuel combustion generates energy and reducing gases for iron ore. When injected, coal is subjected to drastic conditions in the raceway of blast furnace: temperatures around 2400 K, heating rates in order of 10^5 to 10^6 K/s and residence times of 10 to 40 ms. Therefore total combustion of coal, especially at high injection rates, is unlikely. It is fundamental to select coals for PCI with good combustibility, thus minimizing the generation of residual solid (char), which can damage the BF operation. There are several types of reactors for the evaluation of coal combustion, such as thermobalances, drop tube furnaces and PCI test rigs. Thermobalances are fixed-bed reactors operating at low heating rates and drop tube furnaces are more suitable for boiler simulation and evaluation of single coals. For operational, strategic and logistical reasons steel mills use coal blends of different characteristics for PCI. Nowadays PCI test rigs are the best option of reactors for evaluation of coals and other fuels for injection. In this context, the Iron and Steelmaking Laboratory of the Federal University of Rio Grande do Sul (LaSid-UFRGS) designed and developed a PCI test rig with innovative features, such as collection of char, quantitative analysis of combustion gases by gas chromatography and acquisition of temperature and pressure data by ultrafast sensors. Unlike the existing models, the equipment is fully automated, being the only one in the country in vertical arrangement, minimizing pressure loss and allowing operation with greater stability. The present work aims to present the characteristics of the LaSid-UFRGS PCI test rig and preliminary experimental results.

Key-Words: Ironmaking. Blast furnace. Raceway. Fuels. Pulverized coal.

1 INTRODUÇÃO

A injeção de carvão pulverizado em alto-forno (AF) através do processo de PCI (*Pulverized Coal Injection*) é uma tecnologia amplamente utilizada na siderurgia. O PCI é efetivo tanto na redução do consumo de coque, que está diretamente relacionado ao custo por tonelada de ferro-gusa produzido, quanto no aumento da produtividade dos AFs. Além dessas vantagens, o PCI pode reduzir o impacto das usinas siderúrgicas na geração de CO₂ através da injeção combinada de carvão vegetal e carvão mineral, ou associada com combustíveis menos poluentes como o gás natural. (BABICH et al., 2008; CARPENTER, 2006). A combustão do carvão pulverizado injetado nas ventaneiras dos AFs ocorre sob condições extremas: temperatura de cerca de 2400 K, taxa de aquecimento de 10⁵ a 10⁶ K/s, pressão de cerca de 450 kPa e tempo de residência entre 10 a 40 ms. A atmosfera é composta por ar pré-aquecido enriquecido com oxigênio de 1250 a 1500 K e a velocidade do gás é de cerca de 180 a 250 m/s (CARPENTER, 2006).

Medições diretas em AFs em operação são caras e requerem sofisticados equipamentos devido às condições hostis que prevalecem no local (MACHADO, 2009), logo não existem testes padrão para determinação dos parâmetros de combustão. Uma abordagem para se avaliar a combustibilidade de carvões usados em PCI pode ser a análise dos particulados carbonosos presentes nos gases de saída do AF (MACHADO et al., 2013) ou modelos teóricos computacionais (SHEN et al., 2008). Devido à complexidade dos fenômenos que ocorrem nesta região são necessárias validações experimentais para aperfeiçoamento dos modelos e otimização de resultados (MACHADO, 2009). Uma alternativa factível de estudo do ponto de vista técnico é a avaliação da combustão empregando equipamentos de escala laboratório/piloto. Alguns equipamentos tipicamente utilizados em laboratório para este fim são termobalanças, fornos de queda livre e simuladores da zona de combustão dos AFs

Termobalanças são reatores de leito fixo de escala laboratorial usados para análise termogravimétrica (TGA). Nesta técnica, a massa da amostra é continuamente monitorada em relação ao tempo ou temperatura, enquanto a temperatura da amostra, sob uma atmosfera específica, é programada. Termobalanças tem sido frequentemente utilizadas para avaliar o

comportamento de combustão e gaseificação de combustíveis para PCI (OSÓRIO et al., 2006, POHLMANN et al., 2010, SAHU et al., 2014), porém não são apropriadas para simular as condições extremas que prevalecem nos processos de combustão e gaseificação.

Fornos de queda livre são equipamentos de escala de laboratório formados por um forno tubular vertical, operado a temperaturas entre 1300 e 1600 K. O tempo de residência típico nesse reator está na ordem de 0,1 s, promovendo taxas de aquecimento das partículas de combustível de no mínimo 10⁴ K/s (OSÓRIO et al., 2006, DU, CHEN e LUCAS, 2010). Experimentos em fornos de queda livre são usados para avaliar a combustibilidade de carvões principalmente para uso em caldeiras, mas também tem sido empregados para avaliar carvões visando PCI devido às condições similares em alguns aspectos. Por os resultados serem baseados na análise das cinzas produzidas esses equipamentos não são adequados para avaliação da combustão de misturas de carvões (OSÓRIO et al., 2006).

Institutos de pesquisas ao redor do mundo desenvolveram diferentes simuladores da zona de combustão do AF e procedimentos para avaliar a combustão de carvão (HUTNY et al., 1996; MATHIESON et al., 2005; LI et al., 2014). No Brasil há três simuladores em operação: na Usiminas (REIS, 2003), na Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP (ASSIS et al., 2014) e na Companhia Siderúrgica Nacional – CSN (SILVA, 2008). Todos são formados por dois fornos, um para pré-aquecimento do oxigênio a temperatura de sopro e o outro para simular as condições térmicas na zona de combustão. Esses simuladores foram baseados no modelo desenvolvido nos anos 80 na Universidade Técnica de Aachen, na Alemanha (WIPPERMANN, 1996). Seu projeto compacto e operação simplificada possivelmente foram as principais razões para adotá-lo como base para os simuladores brasileiros. Inicialmente o simulador de Aachen foi construído em configuração horizontal, mas nos anos 90 foi modificado para a posição vertical para evitar a formação de depósitos e incrustações em suas tubulações. O simulador representa desde a zona das ventaneiras até aproximadamente 20 cm para dentro da zona de combustão (MACHADO et al., 2013). Os simuladores são considerados atualmente os equipamentos mais apropriados para avaliar a combustão de carvões para PCI por operarem em condições similares àquelas encontradas na zona

de combustão do AF (MACHADO et al., 2013, MACHADO, 2009).

Este trabalho tem por objetivo apresentar as características do simulador da zona de combustão do AF desenvolvido pelo Laboratório de Siderurgia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LaSid-UFRGS). Alguns aspectos dos testes iniciais realizados no equipamento e resultados preliminares são apresentados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 CONCEPÇÃO E DESIGN DO SIMULADOR

O simulador da zona de combustão AF desenvolvido pelo Laboratório de Siderurgia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil (LaSid) é um equipamento de escala laboratorial para a queima de combustíveis pulverizados em condições próximas das que prevalecem na zona de combustão dos AFs.

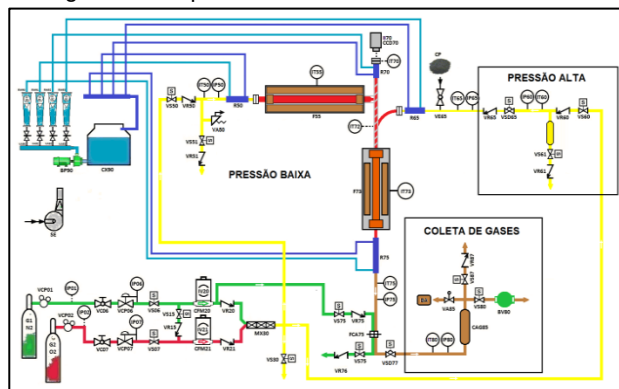
Podem-se citar como diferenciais do projeto a operação fácil e de baixo custo, a automatização, a aquisição de dados em alta velocidade, o controle flexível dos parâmetros operacionais e a coleta tanto de gases de combustão quanto de char. Seu arranjo vertical, único no país, possibilita uma menor perda de pressão e operação mais estável. Atualmente os ensaios são por tiro (modo discreto), porém existe a possibilidade de adaptação para modo contínuo de injeção de combustíveis sólidos e gasosos (MACHADO et al., 2013; RECH et al., 2014). O modelo base selecionado para a construção do simulador foi o do IEHK-RWTH, em Aachen, na Alemanha (KORTHAS, 1987).

A Figura 1 mostra esquematicamente o simulador do LaSid. Como outros simuladores semelhantes, o equipamento reproduz o comportamento de combustíveis sólidos da zona de injeção até a zona de combustão, com a mesma sequência de zonas de aquecimento, desvolatilização e reação.

O simulador consiste basicamente de três regiões: a) pressão baixa; b) pressão alta; c) coleta de gases. Cada região opera em diferentes níveis de pressão. A região de pressão baixa consiste na maior parte do simulador e opera em pressões menores, de 200 a 300 kPa. Esta área do equipamento é composta das seguintes regiões: pré-aquecimento do gás, injeção do combustível

sólido, zona de combustão, pós-combustão e coleta de char. Na região de pressão alta, que opera com pressões acima de 500 kPa, o gás é impulsionado em alta velocidade contra a amostra, que será então arrastada através do combustor. A região de coleta de gases é mantida sob vácuo de 10 a 50 kPa antes do ensaio.

Figura 1 - Esquema do simulador do LaSid-UFRGS



A Figura 2 apresenta uma foto do simulador do LaSid. O equipamento foi desenvolvido com uma configuração diferente dos fornos quando comparado a simuladores existentes. O forno de pré-aquecimento (F55) está posicionado horizontalmente enquanto o forno de combustão (F73) está posicionado verticalmente. Este arranjo permite avaliar com mais eficiência o perfil térmico das temperaturas dentro do forno de combustão e ao longo do eixo de combustão, onde ocorrem o aquecimento, a desvolatilização e a combustão do material injetado. Esta configuração também permite a leitura contínua da temperatura no ponto de mistura das partículas de combustível sólido com o gás oxidante pré-aquecido.

Figura 2 – O simulador do LaSid-UFRGS



2.2 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

2.2.1 Zona de combustão

O reator de combustão é um tubo de alumina de alta pureza com diâmetro interno de 25 mm, comprimento de 600 mm e espessura de parede de 3 mm inserido verticalmente no forno de combustão.

O reator de alumina foi selecionado para permitir aquecimento a 1700 K, criando condições de combustão próximas das existentes na zona de combustão do AF.

2.2.2 Pré-aquecimento de gás, zona de tiro, combustível sólido, resfriadores, sólido residual e coleta do gás de combustão

As demais partes do simulador são de aço inoxidável refratário SS 310 *schedule* 40 para suportar pressões de até 1000 kPa e temperaturas de até 1300 K. Os resfriadores são de aço inoxidável SS 304, compatível com temperaturas locais menores. Os diâmetros internos estabelecidos para os tubos foram de 25 mm para as zonas de tiro, de arraste do carvão com gás frio e de pós-combustão, de 50 mm para a zona de pré-aquecimento do gás oxidante a 1300 K e 12 mm para a zona de injeção após a válvula de tiro.

2.2.3 Fornos de pré-aquecimento e combustão

O pré-aquecimento é feito por um forno resistivo tubular horizontal com 60 mm de diâmetro que pode alcançar temperaturas de até 1500 K. O comprimento do tubo pré-aquecido é de aproximadamente 1 m.

A zona de combustão é formada basicamente por um forno resistivo tubular vertical. Esse forno possui diâmetro de 30 mm e comprimento aquecido de 300 mm, podendo chegar a temperaturas de até 2000 K.

2.2.4 Sistemas de controle e aquisição de dados

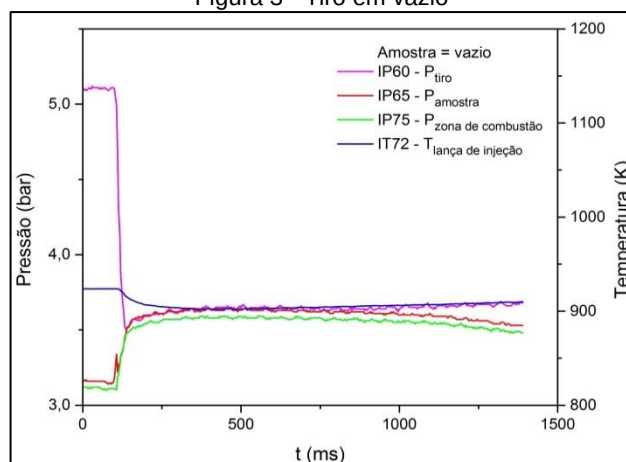
O simulador do LaSid possui sistema de controle automatizado e opera por meio de um conjunto de rotinas que compõem as diversas etapas dos ensaios, que podem ser de combustão ou de pirólise. Os principais conjuntos de rotinas são: teste de pressurização a frio, pré-aquecimento

dos fornos e posterior resfriamento, limpeza, preparação do ensaio, ensaio e coleta de amostra. Essas rotinas são compostas por sub-rotinas que comandam os tempos de abertura e fechamento de válvulas, vazões de gases utilizadas, pressões das diferentes regiões do simulador, aquisição de dados entre outros. O sistema de aquisição de dados registra as informações de tempo, pressão e temperatura durante os ensaios. O sistema possui duas formas de aquisição, uma lenta (1 s), que coleta todos os dados obtidos, e uma rápida (1 ms), que coleta três pressões e uma temperatura. Os dados coletados na aquisição rápida são relevantes aos ensaios e mostram a evolução das pressões durante a injeção e combustão da amostrada pulverizada, bem como o pico de temperatura representante da combustão.

Foi adquirido um conjunto de termopares japoneses ultrarrápidos, com espessura de 40 μ m e com constante de tempo inferior a 1 ms. Também complementa os equipamentos especiais de aquisição de dados uma filmadora de alta velocidade (1200 quadros/segundo). A filmadora, os termopares ultrarrápidos e os sensores de pressão, que também possuem constante de tempo inferior a 1 ms, são utilizados para avaliar as constantes cinéticas da combustão e a evolução das variáveis termodinâmicas no curto período de tempo do ensaio.

Na Figura 3 é apresentado um gráfico gerado pelo supervisor do simulador durante um ensaio sem amostra (tiro em vazio) para verificação da aquisição de dados.

Figura 3 - Tiro em vazio



O IP60 registra a pressão na região de alta pressão, onde será dado o tiro. Na região de baixa

pressão há dois sensores para medição da pressão, um na zona de injeção (IP65) e outro na zona de coleta do char (IP75). Os dados do IT72 correspondem à temperatura no ponto de encontro do carvão com o gás reagente pré-aquecido. No momento do tiro a pressão da zona de alta pressão cai devido à liberação do gás enquanto a pressão da zona de baixa pressão aumenta, pois recebe o fluxo de gás. Ao final do tiro as pressões se equalizam. A temperatura apresenta uma queda devido à entrada de gás frio no sistema.

2.2.5 Preparação da amostra

A matéria-prima utilizada foi carvão brasileiro da Mina do Leão II, localizada no município de Minas do Leão (RS). A amostra foi beneficiada por meios densos até um teor de cinzas de 18,9%. Este carvão está sendo estudado quanto à viabilidade de seu uso para injeção em AFs na forma de mistura com carvões importados, em função disso o teor de cinzas foi limitado em até 20%.

A preparação das amostras foi realizada segundo a norma ASTM D 2013-03. A granulometria de trabalho foi de 25-75 μm . O material abaixo de 25 μm foi removido através de peneiramento a vácuo usando uma peneiradora a jato de ar da marca Retsch modelo AS 200 jet.

2.2.6 Testes pré-operacionais

Foram avaliadas três massas de amostra empregando atmosfera de oxigênio em condição de pressões alta/baixa (PA/PB) de 4/2. As massas de amostra utilizadas foram 1,0, 1,5 e 2,0 g.

A eficiência de combustão foi avaliada por gráficos de pressão e temperatura de acordo com o tempo e pela relação CO/CO_2 , que é o principal parâmetro de avaliação utilizado nos simuladores da zona de combustão do AF existentes.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta os resultados da caracterização da amostra por análise imediata, análise elementar, poder calorífico superior e índice de inchamento livre.

O carvão Leão II é um carvão sub-betuminoso alto-volátil sem propriedades

aglutinantes cujo teor de matéria volátil é de 32,3%. Portanto, espera-se uma elevada eficiência de combustão durante os ensaios.

As Figuras 4, 5 e 6 apresentam os resultados de pressão e temperatura para cada massa testada.

Figura 4 – Ensaio de combustão com 1,0 g

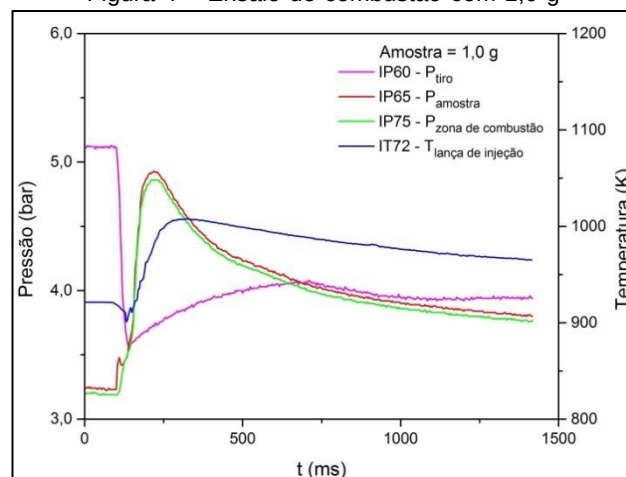


Figura 5 – Ensaio de combustão com 1,5 g

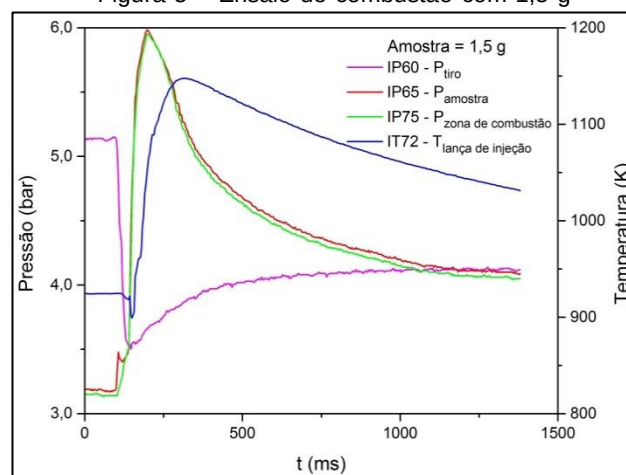


Figura 6 – Ensaio de combustão com 2,0 g

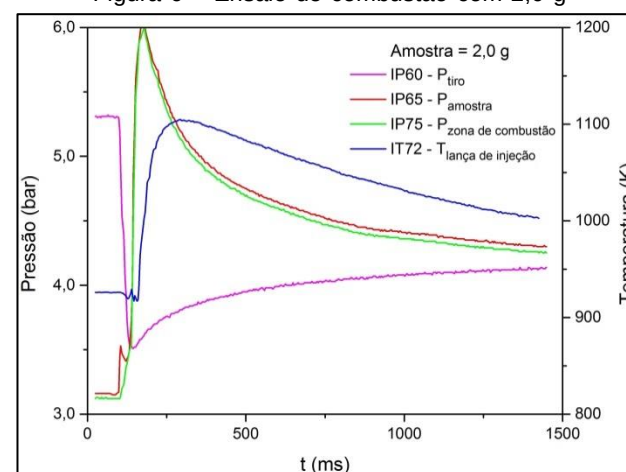


Tabela 1 - Caracterização do carvão Leão II utilizado no estudo

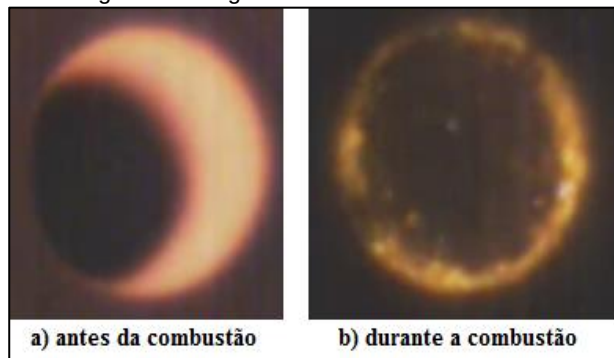
Cz _{bs} (%)	MV _{bs} (%)	CF _{bs} (%)	C _{bs} (%)	H _{bs} (%)	N _{bs} (%)	O _{bs} (%)	S _{Totalbs} (%)	PCS (MJ/kg)	FSI
18,9	32,3	48,8	63,8	4,1	1,1	11,5	0,6	21,5	0

Cz_{bs}: cinzas em base seca; MV_{bs}: matéria volátil em base seca; CF_{bs}: carbono fixo em base seca; C_{bs}: carbono em base seca; H_{bs}: hidrogênio em base seca; N_{bs}: nitrogênio em base seca; O_{bs}: oxigênio em base seca; S_{Totalbs}: enxofre total em base seca; PCS: poder calorífico superior; FSI: índice de inchamento livre (*FSI - Free Swelling Index*).

Diferentemente do gráfico da Figura 3, onde o ensaio é um tiro em vazio, nas Figuras 4, 5 e 6 verificam-se picos de pressão (IP60 e IP65) e de temperatura (IT72) ocasionados pela reação de combustão ultrarrápida da matéria volátil do carvão. Quanto maior a massa de amostra injetada, maior a pressão máxima de combustão atingida, pois é maior a massa de voláteis queimados. No caso de reação de combustão, a queda de temperatura inicial, além da entrada do gás frio, representa a secagem e aquecimento do carvão até o início da pirólise.

Na Figura 7 tem-se uma imagem comparativa do reator antes e durante a combustão das partículas de carvão.

Figura 7 - Imagens da combustão do carvão



Na Tabela 2 são apresentadas as relações CO/CO₂ de acordo com a massa de amostra injetada. Uma menor relação CO/CO₂ indica uma maior eficiência de combustão, pois quanto mais completa a combustão maior o teor de CO₂ gerado. No caso das amostras avaliadas a relação CO/CO₂ seguiu o comportamento esperado: a menor relação foi observada para a menor massa (1,0 g), mais fácil de queimar, e a maior relação para a maior massa (2,0 g), de queima mais difícil.

Tabela 2 – Relação CO/CO₂

Massa de amostra (g)	1,0	1,5	2,0
CO/CO ₂	0,1	0,4	0,5

4 CONCLUSÕES

O simulador da zona de combustão do alto-forno projetado e desenvolvido pelo LaSid-UFRGS foi testado e se mostrou adequado para a avaliação de carvão pulverizado em condições mais próximas às encontradas em um AF. Os resultados são bastante coerentes e a fase atual do projeto é a de otimização das condições experimentais. Estão sendo feitas comparações entre diferentes combustíveis (carvões de diferentes características, coque de petróleo e carvão vegetal). O sólido residual será avaliado quanto à sua estrutura e reatividade ao CO₂, pois no AF este material encontra um ambiente rico neste gás ao sair da zona de combustão. Os resultados serão apresentados posteriormente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq/Rede Carvão (Processo nº 560694/2010-5) pelo financiamento do projeto e à Vale S.A. pelo suporte financeiro a infraestrutura para a instalação do equipamento.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, C.F.C.; TENÓRIO, J.A.S.; ASSIS, P.S.; NATH, N.K. Experimental simulation and analysis of agricultural waste injection as an alternative fuel for blast furnace. *Energy & Fuels*. 2014;28:7268-73.
- BABICH, A.; SENK, D.; GUDENAU, H.W.; MAVROMMATIS, K. *Ironmaking Textbook*. Aachen, 2008.
- CARPENTER, A.M. Use of PCI in blast furnaces. London: IEA Clean Coal Centre; 2006.
- DU, S.W.; CHEN, W.H.; LUCAS, J.A. Pulverized coal burnout in blast furnace simulated by a drop tube furnace. *Energy*. 2010;35:576-81.
- HUTNY, W.P.; GIROUX, L.; MACPHEE, A.; PRICE, J.T. Quality of coal for blast furnace injection. In: AISE. *Anais do Blast Furnace Injection Symposium*; 1996; Cleveland, EUA, p.1-32.
- KORTHAS, B. Untersuchung der verbrennungsvorgänge hoher kohlenstaubmengen unter hochofennahen bedingungen und ihre auswirkungen auf die hochofenströmung. [tese de doutorado]. Aachen: Aachen Univeristy, 1987.
- LI, H.; ELLIOTT, L.; ROGERS, H.; WALL, T. Comparative study on the combustion performance of coals on a pilot-scale test rig simulating blast furnace pulverized coal injection and a lab-scale drop-tube furnace. *Energy & Fuels*. 2014;28:363-8.
- MACHADO, J.G.M.S. Estudo de reatividade e combustão de carvões minerais, carvão vegetal e misturas [tese de doutorado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2009.
- MACHADO, AS. Quantificação do teor de char e finos de coque no pó de balão do alto-forno por difração de raios-X [dissertação de mestrado]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2011.
- MACHADO, A.S.; POHLMANN, J.G.; VILELA, A.C.F.; OSÓRIO, E. Construção de um simulador da zona de combustão do alto-forno para a avaliação de combustíveis sólidos e gasosos. In: III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral. *Anais do III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral*; 2013; Gramado, Brasil.
- MATHIESON, J.G.; TRUELOVE, J.S.; ROGERS, H. Toward an understanding of coal combustion in blast furnace tuyere injection. *Fuel*. 2005;84(10):1229-37.
- OSÓRIO, E.; GOMES, M.L.I.; VILELA, A.C.F.; KALKREUTH, W.; ALMEIDA, M.A.A.; BORREGO, A.G.; ALVAREZ, D. Evaluation of petrology and reactivity of coal blends for use in pulverized coal injection (PCI). *International Journal of Coal Geology*. 2006;68:14-29.
- POHLMANN, J.G.; OSÓRIO, E.; VILELA, A.C.F.; BORREGO, A.G. Reactivity to CO₂ of chars prepared in O₂/N₂ and O₂/CO₂ mixtures for pulverized coal injection (PCI) in blast furnace in relation to char petrographic characteristics. *International Journal of Coal Geology*. 2010;84:293-300.
- RECH, R.L.; MACHADO, A.S.; BARBIERI, C.C.T.; MACHADO, J.G.M.S.; VILELA, A.C.F.; OSÓRIO, E. Desenvolvimento de equipamento de laboratório para simular PCI em altos-fornos. In: 44º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas. *Anais do 44º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas*; 2014; Belo Horizonte, Brasil.
- REIS, H.M.B. Estudo da combustão de misturas de carvões de baixo e alto ranks [dissertação de mestrado]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.
- SAHU, S.G.; et al. Evaluation of combustion behaviour of coal blends for use in pulverized coal injection (PCI). *Applied Thermal Engineering*. 2014;73:1014-21.
- SHEN, Y.; et al. Three-dimensional modelling of coal combustion in blast furnace. *ISIJ International*. 2008;48(6):777-86.
- SILVA, A.M. Estudo da utilização da biomassa em substituição parcial ao carvão mineral no processo de fabricação do ferro-gusa em alto-forno [tese de doutorado]. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, 2008.
- WIPPERMANN, S. Kombiniertes Einblasen von Kohle und Feinerz oder eisenhaltigen Hüttenreststoffen in den Hochofen [tese de doutorado]. Aachen: Aachen Univeristy, 1996.