

## INFLUÊNCIA DOS VOLÁTEIS E DO TAMANHO DE PARTÍCULAS DE CARVÕES NA COMBUSTÃO EM SIMULADOR DE PCI\*

Hector Alejandro Picarte Fragoso<sup>1</sup>

Juliana Gonçalves Pohlmann<sup>2</sup>

Janaína Gonçalves Maria da Silva Machado<sup>3</sup>

Antônio Cezar Faria Vilela<sup>4</sup>

Eduardo Osório<sup>4</sup>

### Resumo

O presente trabalho é um estudo preliminar a respeito do efeito dos voláteis na combustibilidade e também visa identificar a influência do tamanho de partícula na variação da pressão durante a combustão no Simulador de PCI. Foram estudados um carvão alto, um baixo volátil e misturas desses carvões. A avaliação do efeito dos voláteis se deu a partir da medida da variação de pressão no reator ocasionada pela combustão e pelo cálculo do *burnout* dos chars coletados após o ensaio. A análise do efeito do tamanho de partícula sobre a variação da pressão durante a combustão se deu através da combustão do carvão baixo volátil em diferentes faixas granulométricas. Os resultados mostraram que o carvão alto volátil apresentou a maior combustibilidade e que quanto maior o teor desses carvões na mistura, maior foi a combustibilidade da mistura. O Simulador de PCI separou satisfatoriamente, através dos perfis de pressão, o comportamento durante a combustão de carvões com diferentes teores de voláteis, suas misturas e variadas faixas granulométricas. A relação entre a variação da pressão e a combustibilidade dos carvões e suas misturas ainda precisa ser mais exploradas.

**Palavras-chave:** Carvão; PCI; Combustão; Simulador de PCI

### INFLUENCE OF VOLATILE AND PARTICLE SIZE OF COALS ON COMBUSTION IN PCI RIG

#### Abstract

The present work is a preliminary study about the effect of volatiles on combustibility and also aims to identify the influence of particle size on the variation of pressure during combustion in the PCI Rig. A high and low volatile coal and mixtures of these coals were studied. The evaluation of the effect of the volatiles was based on the measurement of the pressure variation in the reactor caused by the combustion and the calculation of the burnout of the chars collected after the test. The analysis of the effect of particle size on the pressure variation during combustion occurred through the combustion of the low volatile coal in different size ranges. Results showed that the high volatile coal presented the highest combustibility and that the higher the content of these coals in the mixture, the greater the combustibility of the mixture. The PCI Rig satisfactorily separated, through the pressure profiles, the behavior during the combustion of coals with different volatile contents, their mixtures and various granulometric bands. The relationship between the pressure variation and the combustibility of the coals and their mixture has yet to be further explored.

**Keywords:** Coal; PCI; Combustion; PCI Rig

<sup>1</sup> Engenheiro, Laboratório de Siderurgia (LaSid) da UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>2</sup> *Doutora, Laboratório de Siderurgia (LaSid) da UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.*

<sup>3</sup> *ProfessoraDra., Laboratório de Siderurgia da UFC, Fortaleza, CE, Brasil.*

<sup>4</sup> *Professor Dr., Laboratório de Siderurgia (LaSid) da UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

A injeção de carvão pulverizado através das ventaneiras dos altos-fornos permite a redução do consumo de coque, o aumento da produtividade do alto-forno além de contribuir para uma flexibilidade operacional, já que o ajuste nos parâmetros de injeção tem um efeito mais imediato no alto-forno do que qualquer mudança sobre a carga do reator [1,2]. Operar sob elevadas taxas de injeção com uma maior taxa de substituição torna necessário a otimização dos parâmetros operacionais, o que demanda a compreensão do comportamento do carvão durante sua combustão sob condições extremamente severas. A medição direta no alto-forno de parâmetros que permitam esta avaliação é extremamente onerosa e necessita de equipamentos sofisticados. Desta forma, algumas técnicas experimentais vem sendo desenvolvidas de forma que, apesar de não reproduzirem todas as condições operacionais, oferecem informações que os métodos analíticos convencionais não podem fornecer. Inúmeros centros de pesquisas ao redor do mundo, como Japão, Austrália, Canada, Alemanha e Brasil investiram na construção de reatores capazes de produzir condições que se aproximam das condições impostas no sistema de injeção dos altos-fornos [3–7].

No Laboratório de Siderurgia (LaSid) da UFRGS foi construído um reator, chamado de Simulador de PCI (*Pulverized Coal Injection*), capaz de produzir condições que se aproximam das condições impostas ao carvão pelo sistema de injeção como pressão, taxa de aquecimento, curto tempo de residência e as partículas de carvão em uma fase dinâmica e diluída. Dessa forma, sob essas condições, o Simulador de PCI pode prover informações a respeito do comportamento do carvão que outros equipamentos que operam sob condições estáticas, baixa taxa de aquecimento e pressão atmosférica (como a termobalança ou fornos de queda livre) não podem.

Sabe-se que carvões de maior teor de matéria volátil apresentam maior combustibilidade frente a carvões de mais baixo teor de voláteis, mas podem aumentar consideravelmente o volume de gases e a pressão na região das ventaneiras [1]. Uma vez que o processo de desvolatilização se dá sob elevadas pressões na entrada do carvão pela lança de injeção, há uma tendência de o processo de desvolatilização ter um menor rendimento em voláteis, além de propiciar um aumento da taxa de gaseificação do char [1]. Não foi encontrado na literatura um equipamento capaz de fornecer parâmetros de aumento de pressão e tempo de reação aplicados ao processo de injeção no alto-forno.

O presente trabalho é um estudo preliminar a respeito do efeito dos voláteis na combustibilidade e também visa identificar a influência tamanho de partícula na variação da pressão durante a combustão no Simulador de PCI. Foram estudados um carvão alto e um baixo volátil e misturas desses carvões. A avaliação do efeito dos voláteis se deu a partir da medida da variação de pressão no reator ocasionada pela combustão e pelo cálculo do burnout dos chars coletados após o ensaio. A análise do efeito do tamanho de partícula sobre a variação da pressão durante a combustão se deu através da combustão do carvão baixo volátil em diferentes faixas granulométricas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização dos carvões utilizados no estudo

Foram selecionados dois carvões importados comumente empregados na injeção em altos-fornos, sendo um carvão colombiano betuminoso alto-volátil com cerca de 15% de voláteis (A) e um carvão australiano betuminoso baixo volátil (B) com 38% de voláteis. Na Tabela 1 são apresentadas as análises imediata, elementar e petrográfica (refletância média da vitrinita e composição maceral) dos carvões utilizados neste trabalho. A análise imediata foi realizada segundo a norma ASTM D7582 e a análise elementar foi segundo a norma ASTM D3176.

Tabela 1 - Caracterização dos carvões utilizados

Carvões	Análise Imediata (b.s.)			Análise Elementar (b.s)					Análise Petrográfica			
	Mv %	Cz %	CF %	C %	H %	N %	S %	O* %	Rm %	V % vol. Imm.	L %	I %
A	38,00	10,80	51,20	82,50	5,60	1,80	0,90	9,20	0,61	82,73	2,56	14,71
B	15,40	10,60	74,00	91,20	4,40	1,90	0,80	1,70	1,54	68,84	-	31,15

b.s – base seca. % vol. Imm – Fração volumétrica isenta de matéria mineral; Mv – Matéria volátil. Cz – Cinzas; CF – Carbono Fixo. Rm – Refletância randômica média da vitrinita. V – Vitrinita. L – Liptrinita. I – Inertinita.

### 2.1 Composição das amostras para ensaio de combustão no Simulador de PCI

A partir dos carvões apresentados na Tabela 1, foram preparados 8 conjuntos de amostras: três conjuntos para avaliação do efeito do tamanho das partículas na pressão durante a combustão do carvão baixo volátil (B) em diferentes faixas granulométricas: B1 com 0,025-0,075 mm, B2 com 0,105-0,250 mm e B3 com 0,250-0,500 mm; cinco conjuntos de amostras em uma única faixa granulométrica de 0,025-0,075 mm foram preparadas para avaliar a influência dos voláteis dos carvões individuais e suas misturas na combustibilidade e na variação da pressão durante a combustão. Esses conjuntos são compostos pelos conjuntos de carvões individuais alto volátil (A1) e baixo volátil (B1) bem como os conjuntos de misturas contendo 75% de A e 25% de B (A75B25), 50% de A e 50% B (A50B50) e 25% de A e 75% de B (A25B75). Os conjuntos de amostras foram submetidos aos mesmos procedimentos adotados na norma ASTM D7582 para a obtenção dos teores de material volátil. Cada conjunto de amostras é composto por vinte alíquotas de 500 mg. A Tabela 2 resume os conjuntos de amostras empregadas no estudo.

Tabela 2 - Conjuntos de amostras utilizados no simulador.

Conjunto de amostras	Faixas Granulométricas	Composição	MV (%) – b.s
A1	0,025-0,075 mm	100% A	39,63
B1	0,025-0,075 mm	100% B	16,26
B2	0,105-0,250 mm	100% B	15,92
B3	0,250-0,500 mm	100% B	15,50
A75B25	0,025-0,075 mm	75% A + 25% B	33,61
A50B50	0,025-0,075 mm	50% A + 50% B	27,93
A25B75	0,025-0,075 mm	25% A + 75% B	21,96

MV – Matéria Volátil; b.s – base seca

## 2.2 Metodologia do ensaio no Simulador

O Simulador de PCI foi projetado com o objetivo de submeter o carvão a condições similares as que ocorrem nas ventaneiras dos altos-fornos, que envolve uma alta taxa de aquecimento da ordem de  $10^5$  a  $10^6$  °C/s, combustão sob pressão e um curto tempo de residência, na faixa de 20 ms. A Figura 1 mostra o equipamento montado na UFRGS.

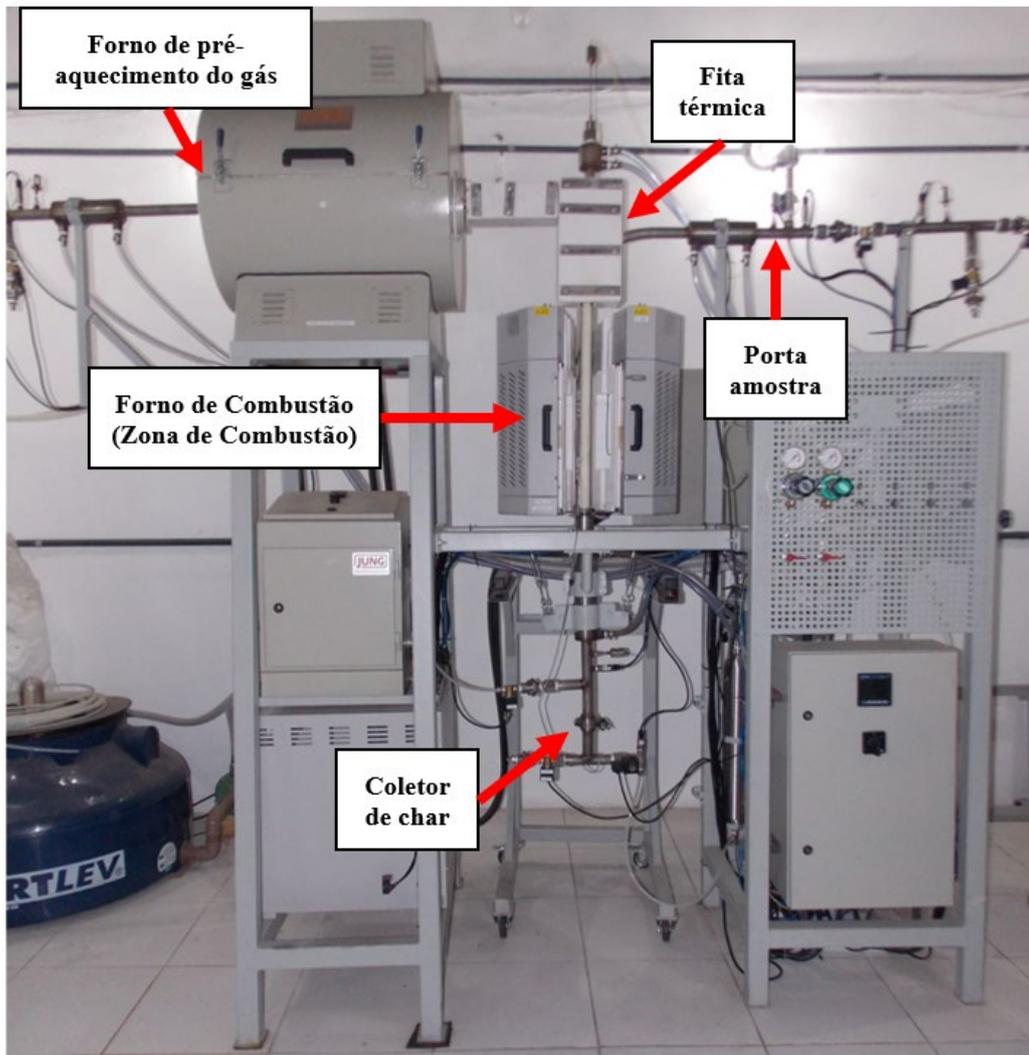


Figura 1 – Simulador de PCI do LaSid/UFRGS

A estrutura e a rotina de operação do equipamento permitem que o gás aquecido no forno de pré-aquecimento escoe e encontre o carvão ejetado a partir do porta-amostra por meio de um pulso de gás, indo ambos em direção ao forno de combustão. O forno de combustão representa a zona de combustão do alto-forno no simulador.

A Figura 2 apresenta um desenho esquemático do sistema que foi dividido em uma zona de alta pressão, a qual é pressurizada para gerar o pulso de gás que empurra a amostra, e a zona de baixa pressão que é o restante do sistema composto pelos fornos.

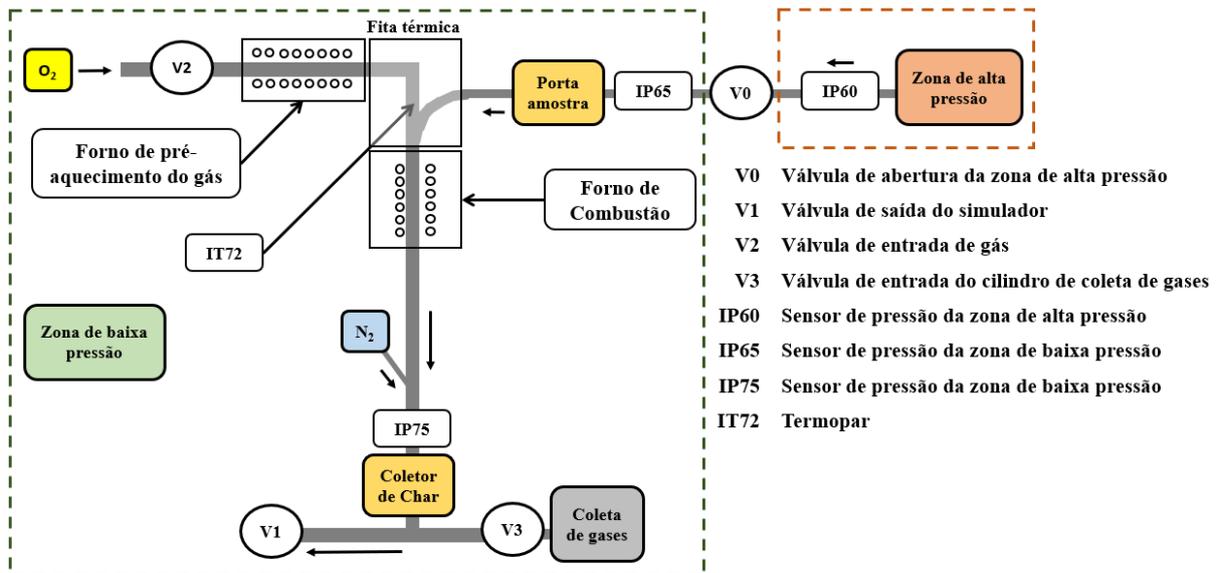


Figura 2– Representação do Simulador de PCI

Conforme o esquema da Figura 2, para a realização do ensaio de combustão a zona de alta pressão é pressurizada com oxigênio puro até uma pressão de aproximadamente 4,2 bar. Após a zona de baixa pressão é também pressurizada até 3,2 bar. A pressão na zona de baixa pressão é mantida por 30 segundos até que a válvula de saída de gás do simulador (V1) é aberta, dando início ao processo de depressurização desta zona pelo escoamento do gás que vem do forno de pré-aquecimento. Quando a zona de baixa pressão atinge uma pressão de 2,0 bar, a válvula (V0) é aberta permitindo a passagem do pulso de oxigênio da zona de alta pressão, o qual empurra a amostra de carvão em direção ao forno de combustão. Após a passagem da amostra através do forno de combustão o char resultante é barrado no coletor de char por meio de um filtro de bronze e é resfriado por um fluxo de nitrogênio. O registro das variações da pressão ao longo do ensaio se dá por dois sensores, o IP65 e o IP75. O sensor IP60 registra a pressão do sistema de “tiro” ao longo do ensaio. A temperatura durante o ensaio é registrada pelo termopar IT72. Maiores detalhes sobre o funcionamento do reator foi discutido por Machado, 2017 [8]

A partir do registro das variações da pressão e da temperatura durante o ensaio em função do tempo, tem-se um conjunto de curvas de pressão e temperatura que caracterizam a passagem do carvão pelo simulador, como observado na Figura 3.

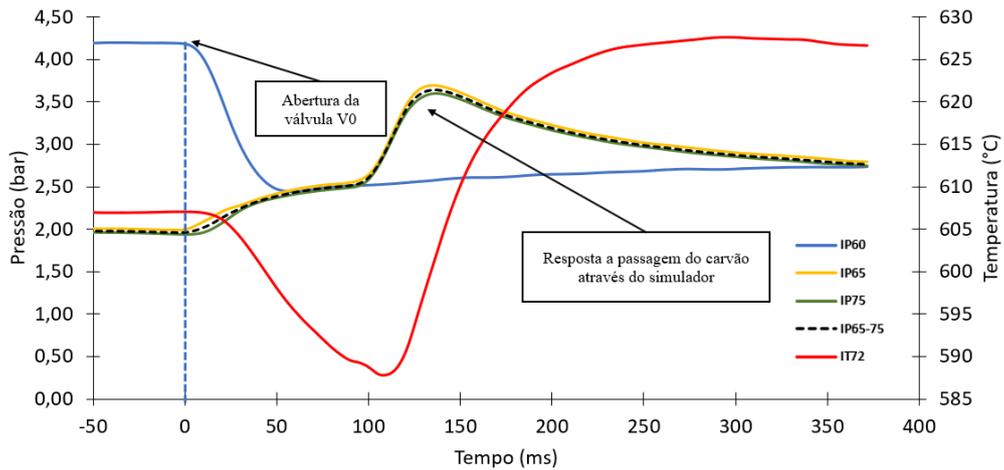


Figura 3 - Curvas de pressão e temperatura registradas no simulador

A variação da pressão  $\Delta P$  (Figura 4), que corresponde ao aumento da pressão devido à desvolatilização/combustão no reator é obtida a partir da subtração da curva IP65-75 (média das curvas IP65 e IP75) com a curva IP60. Foi obtida uma curva média de variação de pressão e calculada sua respectiva derivada primeira para cada conjunto de amostras (Figura 5).

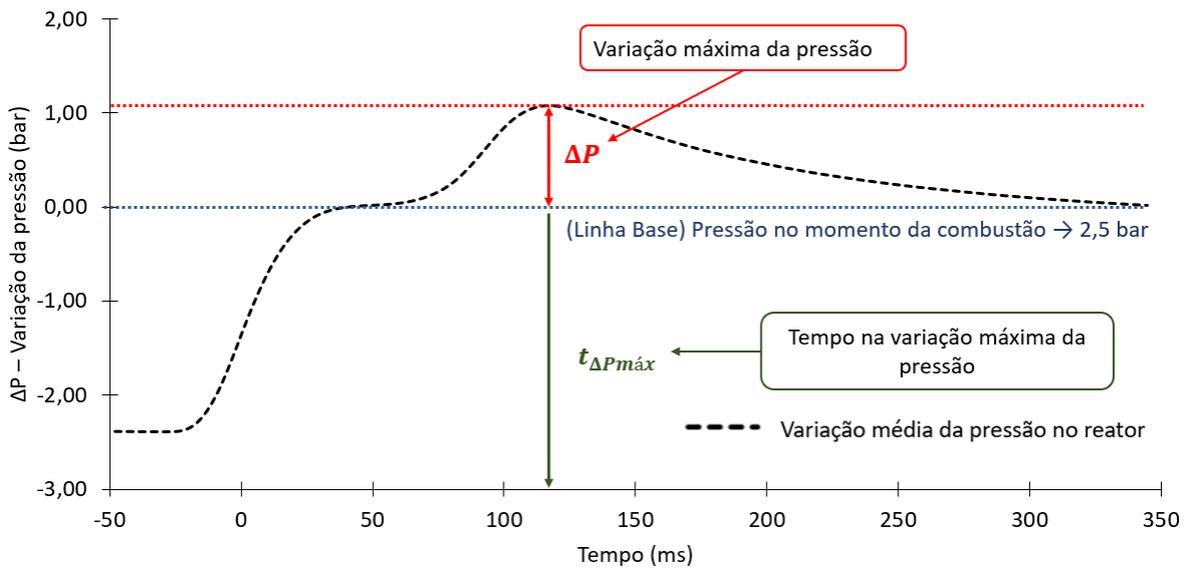


Figura 4 – Curva média da variação da pressão no reator

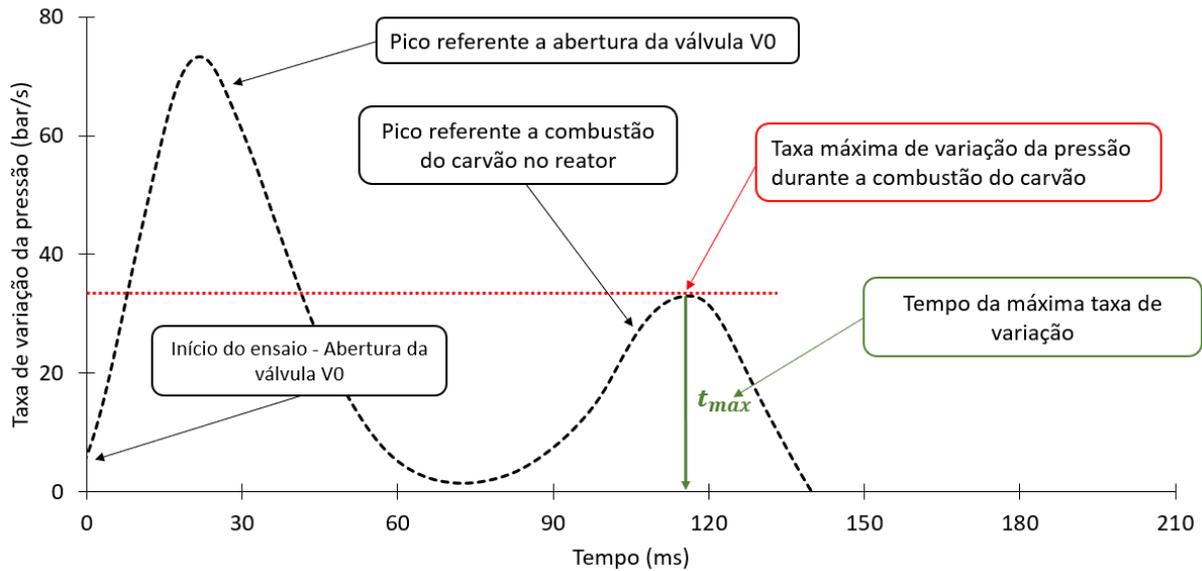


Figura 5 – Derivada primeira da curva média da variação da pressão no reator

A Figura 6 resume as principais etapas para a obtenção da curva de variação da pressão para cada um dos conjuntos de amostras do presente estudo.

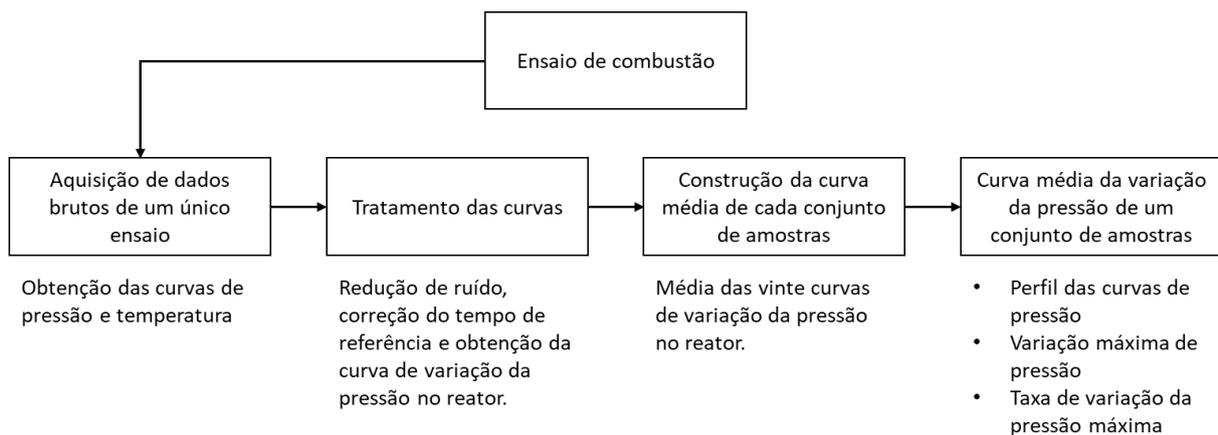


Figura 6 - Etapas para a construção das curvas de pressão e temperatura de um único ensaio no simulador do LaSid

O *burnout*, parâmetro que indica a eficiência de queima, é obtido a partir da relação entre o teor de cinzas dos carvões que entraram no reator com o teor de cinzas dos chars coletados após o ensaio [9] e é calculado a partir da Equação 1 onde  $C_{Z_{carvão}}$  é o teor de cinzas do carvão ou mistura de carvões que originará o char e  $C_{Z_{char}}$  é o teor de cinzas do char coletado no coletor de char do reator.

$$Burnout (\%) = \left[ 1 - \left( \frac{C_{Z_{carvão}}}{100 - C_{Z_{char}}} \right) \times \left( \frac{100 - C_{Z_{char}}}{C_{Z_{char}}} \right) \right] \times 100 \quad (1)$$

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Eficiência da combustão dos carvões individuais e misturas (burnout)

Na Figura 7 é possível notar a relação do *burnout* médio com o teor de voláteis das amostras. A eficiência de combustão das misturas é linearmente previsível a partir dos *burnouts* dos carvões individuais usados nas misturas.

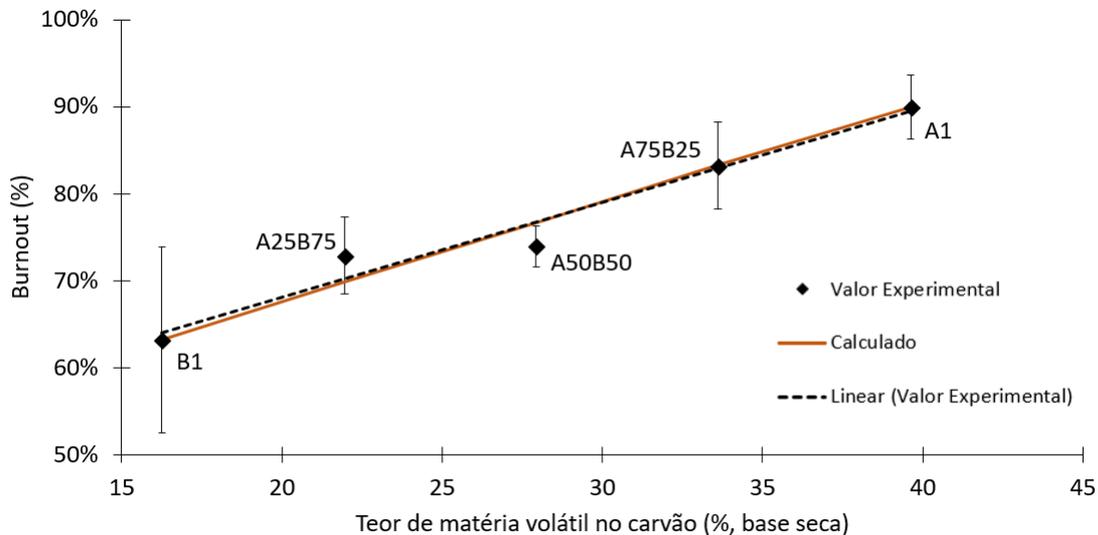


Figura 7 - *Burnout* dos carvões A1, A75B25, A50B50, A25B75 e B1 em O<sub>2</sub> em relação ao teor de material volátil dos carvões

O aumento do teor de voláteis provoca um aumento na combustibilidade, isso porque a medida que o teor de voláteis aumenta, a proporção de gases em relação ao char é maior. As reações homogêneas de combustão dos voláteis com o oxigênio são mais efetivas se comparadas à reação heterogênea do oxigênio com as partículas sólidas do char. Isso significa que a medida que o teor de voláteis aumenta, a eficiência de combustão tende a ser maior [10]. A tendência linear de aumento dos *burnouts* das misturas verificada experimentalmente coincide com a curva calculada a partir dos *burnouts* dos carvões individuais, sugerindo que não houve uma interação entre as partículas de carvões que favorecesse ou que prejudicasse a eficiência de combustão. A ausência na interação pode ter sido promovida pelo excesso de oxigênio no experimento, o que potencializou a combustão.

#### 3.2 Variação da pressão e tempos de reação

A Figura 8 apresenta a variação de pressão no Simulador em função do tempo durante a combustão do carvão baixo volátil (B) nas suas variadas faixas granulométricas. É possível observar que o tamanho das partículas tem um impacto direto na variação da pressão durante a combustão.

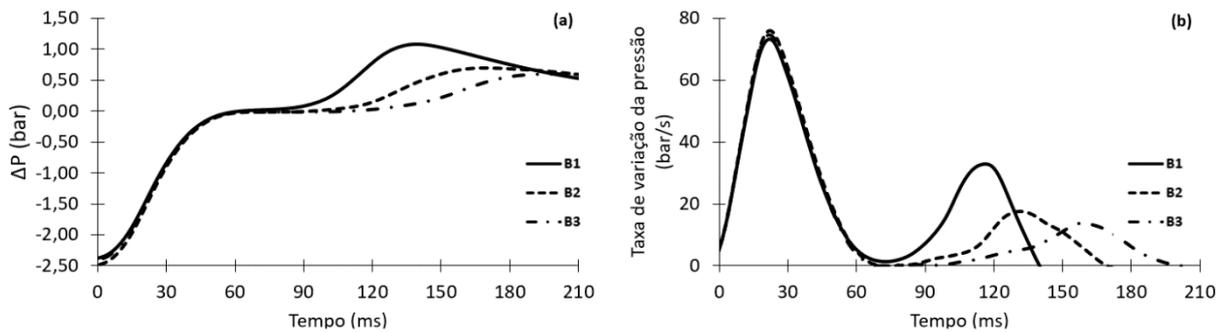


Figura 8 – Perfil das curvas de pressão para diferentes faixas granulométricas. (a) Variação da pressão e (b) taxa de variação da pressão durante a passagem do carvão pelo Simulador de PCI

A amostra B1 (0,025-0,75 mm) apresenta uma faixa granulométrica mais fina do que as amostras B2 (0,105-0,250 mm) e B3 (0,250-0,500 mm). Experimentalmente foi possível observar que durante a combustão a variação da pressão aumenta com a redução do tamanho de partícula do carvão. A amostra B1 apresentou uma variação de pressão aproximadamente 35% maior do que a amostra de faixa granulométrica intermediária, B2, e 45% maior do que a amostra B3. É possível notar também que a variação máxima da pressão (Fig. 8a) se dá em tempos menores com a redução do tamanho de partícula, o que se reflete na taxa de variação da pressão (Fig. 8b). A granulometria mais fina favorece a cinéticas das reações, as partículas tendem a sofrer um processo de desvolatilização mais intenso, já que a transferência de calor da superfície para o centro da partícula e a difusão dos voláteis através da partícula até a superfície apresenta uma resistência menor [1, 10].

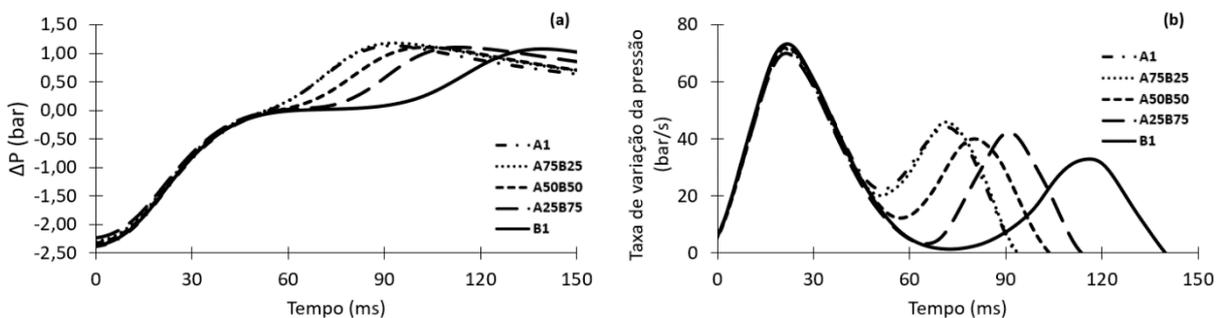


Figura 9 – Perfil das curvas de pressão para os carvões e suas misturas (a) Variação da pressão e (b) taxa de variação da pressão durante a passagem dos carvões A1, B1 e das suas misturas pelo simulador

A Figura 9 mostra as curvas médias das variações de pressão (Fig. 9a) e das taxas de variação da pressão dos carvões A1 e B1 (Fig. 9b), bem como suas misturas (A75B25, A50B50 e A25B75) em função do tempo. O carvão A1 apresenta uma variação máxima de pressão de 1,14 bar no tempo 92 ms enquanto que para o carvão B1 foi de 1,08 bar em 139 ms. A medida que a proporção do carvão A aumenta nas misturas, as curvas tendem a se deslocar para esquerda, atingindo maiores pressões em menores tempos. Isso é refletido nas curvas da derivada primeira da Figura 9b. O aumento da variação da pressão com uma maior proporção do carvão A na mistura é muito suave, porém, conforme a Figura 10, os tempos das variações máximas de pressão foram levemente menores do que o previsto a partir de uma relação linear aditiva. A incorporação do carvão alto volátil na mistura resultou em tempos mais curtos para alcançar a variação máxima de pressão. A

mistura contendo 75% de carvão alto volátil atingiu a máxima variação de pressão no mesmo tempo que o carvão alto volátil individual (92 ms).

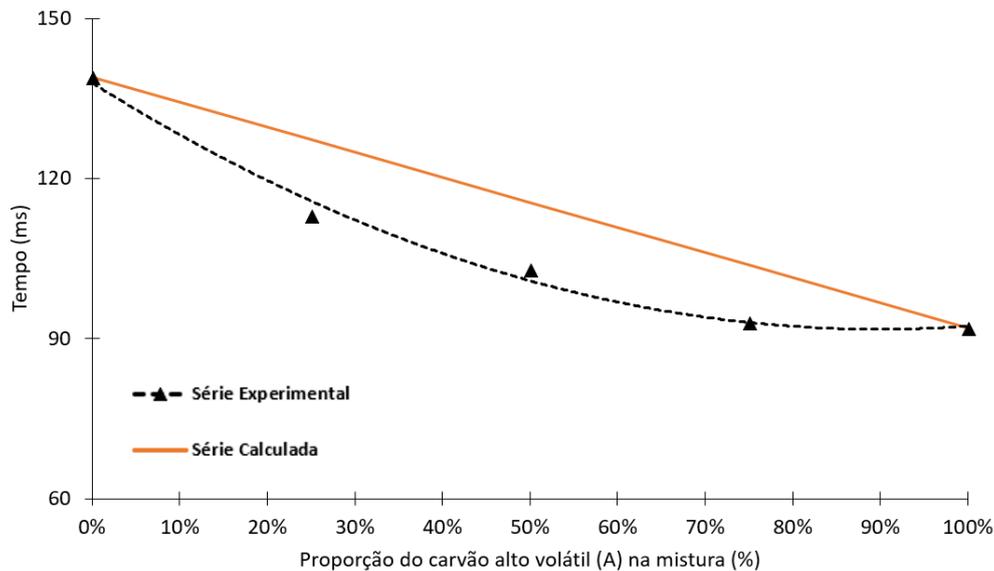


Figura 10 – Tempos em que a variação máxima da pressão é atingida para os carvões individuais e suas misturas

A partir dos resultados obtidos foi possível estabelecer uma correlação entre as características dos carvões e as variações de pressão durante a combustão. O Simulador de PCI separou satisfatoriamente o comportamento durante a combustão de carvões com diferentes teores de voláteis, bem como suas misturas, e variadas faixas granulométricas. Ainda serão realizados testes complementares para uma melhor compreensão do efeito dos voláteis sobre a pressão e sobre a combustibilidade dos carvões.

#### 4 CONCLUSÕES

O *burnout* dos carvões e suas misturas, nas condições do experimento, mostrou uma relação linear com o teor de voláteis, em que quanto maior o teor de voláteis, maior é o *burnout*. Essa relação linear indica que não houve uma interação entre as partículas de carvões nas misturas que promovesse ou prejudicasse a eficiência de combustão.

A variação da pressão no Simulador durante a combustão do carvão baixo volátil em diferentes faixas granulométricas mostrou que quanto mais fina a partículas maior a variação da pressão e ela se dá de forma mais rápida.

A combustão do carvão alto volátil gerou um maior aumento de pressão no reator e em tempos mais curtos comparada à combustão do carvão baixo volátil. As misturas apresentaram aumentos de pressão e tempos de taxa máxima de aumento de pressão levemente deslocados no sentido dos valores do carvão alto volátil.

Os resultados dos ensaios permitiram estabelecer uma correlação entre as características dos carvões e as variações de pressão durante a combustão. O Simulador de PCI separou satisfatoriamente, através dos perfis de pressão, o comportamento durante a combustão de carvões com diferentes teores de voláteis, suas misturas e variadas faixas granulométricas. A relação entre a variação da

pressão e a combustibilidade dos carvões e suas misturas ainda precisa ser mais exploradas.

## Agradecimentos

Os autores desse trabalho agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo financeiro.

## REFERÊNCIAS

1. Carpenter AM. Use of PCI in blast furnaces. London: IEA Coal Research; 2006.
2. Hutny WP, Lee GK, Price JT. Fundamentals of coal combustion during injection into a blast furnace. Prog Energy Combust Sci. 1991;17(4):373–95.
3. Ishii K, organizador. Advanced pulverized coal injection technology and blast furnace operation. 1st ed. Oxford, UK: Pergamon; 2000. 307 p.
4. Ray S, Giroux L, MacPhee T, Ng KW, Todoschuk T. Study of PCI Coals in New Injection Rig at CanmetEnergy (Ottawa). Metec InSteelCon Proceedings. Dusseldorf, Alemanha; 2015
5. Mathieson JG, Truelove JS, Rogers H. Toward an understanding of coal combustion in blast furnace tuyere injection. Fuel. 2005;84(10):1229–37.
6. Babich A, Senk D, Born S. Interaction between Co-injected Substances with Pulverized Coal into the Blast Furnace. ISIJ Int. 2014;54(12):2704–12.
7. Assis PS, Vieira CB, Nolasco Sobrinho PJ. New Developments for Powder Coal Injection into the Blast Furnaces. Steel Res Int. 2004;75(4):235–9.
8. Machado A da S. Automação de simulador de combustão para avaliação dos fenômenos transientes durante a desvolatilização e combustão de carvões para injeção em altos-fornos [Tese]. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais; 2017.
9. Pohlmann JG, Borrego AG, Osório E, Diez MA, Vilela ACF. Combustion of eucalyptus charcoals and coals of similar volatile yields aiming at blast furnace injection in a CO2 mitigation environment. J Clean Prod. 2016;129:1–11.
10. Wu Z. Fundamentals of pulverised coal combustion. London: IEA Clean Coal Centre; 2005.