

COMPORTAMENTO DE CARVÕES NA COMBUSTÃO VISANDO PCI E SUA RELAÇÃO COM AS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS, FÍSICAS E PETROGRÁFICAS*

Gabriel Penna Kramer Lima¹
Hector Alejandro Picarte Fragoso²
Juliana Gonçalves Pohlmann³
Antônio Cezar Farias Vilela⁴
Eduardo Osório⁵

Resumo

O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito das diferentes propriedades químicas, físicas e petrográficas de carvões minerais sobre suas performances na injeção em altos-fornos através de ensaios de combustão utilizando um Simulador PCI (*Pulverized Coal Injection*). No trabalho foram utilizados um carvão betuminoso alto-volátil, três betuminosos baixo-voláteis, tipicamente usados em PCI, e um antracito. O comportamento dos carvões após a sua passagem pelo simulador indicou um aumento do *burnout* com o aumento do teor de voláteis dos carvões. A análise destes comportamentos indicou que no simulador de PCI o papel do teor de voláteis diminuiu com o aumento do *rank* do carvão. O carvão alto-volátil apresentou o maior *burnout*, em contrapartida o antracito apresentou o menor. Os carvões baixo voláteis apresentaram performances intermediárias e, em razão da similaridade dos seus *ranks*, o teor de voláteis não foi suficiente para explicar os seus comportamentos, de maneira que a análise das propriedades físicas e petrográficas permitiu explicar as diferenças entre os seus *burnouts* médios. A associação das análises das propriedades dos carvões com o ensaio de combustão no simulador demonstrou a sua capacidade em distinguir quantitativamente e qualitativamente as performances de carvões para injeção.

Palavras-chave: Injeção de Carvão Pulverizado; Simulador de PCI; Combustibilidade; Alto-forno.

COALS COMBUSTION BEHAVIOR FOR PCI PROCESS AND ITS RELEVANCE WITH CHEMICAL, PHYSICAL AND PETROGRAPHIC COAL PROPERTIES

Abstract

The objective of this paper is to evaluate the effect of the different chemical, physical and petrographic properties of coals on their combustion behavior in blast furnaces process through combustibility tests using a PCI (*Pulverized Coal Injection*) rig. A high-volatile bituminous coal, three low-volatile bituminous, generally applied in PCI, and an anthracite were used. The coals behavior through the PCI-rig indicated an increase in burnout as the volatile content increases. The analysis of these behaviors indicated that in the simulator the role of the volatile content decreased with the increase of the coal rank. The high-volatile coal had the highest burnout, as anthracite had the lowest ones. The low volatile coals showed intermediate performances and, due to the similarity of their ranks, the volatile content was not sufficient to explain their behavior, so that the analysis of the physical and petrographic properties allowed to explain the differences between their average burnout. The association of the analysis of the natural characteristics of the coals with the combustion test in the PCI-rig demonstrated its potential capacity to qualitatively and quantitatively differ coals injection performances.

Keywords: Pulverized Coal Injection; PCI rig; Combustibility; Blast furnace.

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

² Mestre, Laboratório de Siderurgia (LaSid) da UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

³ Doutora, Laboratório de Siderurgia (LaSid) da UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

⁴ Professor Dr., Laboratório de Siderurgia (LaSid) da UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

⁵ Professor Dr., Laboratório de Siderurgia (LaSid) da UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A injeção de carvão pulverizado (*Pulverized Coal Injection* - PCI) é uma tecnologia já consolidada dentro do cenário siderúrgico internacional e nacional, mas a alta heterogeneidade dos carvões com potencial de injeção implica na necessidade de desenvolver novas técnicas que permitam a avaliação e a comparação da qualidade destes combustíveis para a combustão em condições de PCI. O principal objetivo da tecnologia de PCI é a redução do consumo de coque no alto-forno a partir da injeção de carvões não coqueificáveis, resultando na redução do impacto ambiental, maior **flexibilidade** no uso de diferentes matérias-primas e redução nos custos e produção, além de promover um aumento da **flexibilidade** operacional dos altos-fornos.

A combustibilidade apresentada por um determinado carvão injetado depende de suas características químicas, físicas e petrográficas. Porém, estas propriedades não são as únicas determinantes no comportamento do carvão, e em processos de elevadas taxas de injeção a manutenção da qualidade operacional do alto-forno depende das condições de combustão cuja performance do carvão é desenvolvida. Em razão do ambiente da zona de combustão do alto-forno, chamada de *raceway*, ser extremamente severo, com temperaturas da ordem de 2200°C em que a velocidade do gás pode atingir 200 m/s e a pressão 5 bar [1], a medição direta da combustibilidade é onerosa e tecnicamente complexa, de maneira que uma alternativa segura seria a realização de testes prévios em dispositivos analíticos em escala laboratorial.

Apesar de inúmeros estudos envolvendo a combustibilidade de carvões para aplicação em PCI terem sido conduzidos em TGA [2] [3] ou em forno de queda livre (DTF) [4] [5], diversos centros de pesquisa, empresas e universidades tem investido na construção de equipamentos que submetem os carvões a condições mais próximas da zona de combustão [6] [7] [8]. A principal justificativa do investimento nesses reatores é que a performance dos carvões na injeção em altos-fornos é dependente não só de suas propriedades, mas também das condições do processo, como o tempo de residência, temperatura de sopro, velocidade do gás de sopro, velocidade de alimentação, posição da lança de injeção e taxa de injeção [9] [10] [11] [12].

Portanto, o presente trabalho visou realizar a avaliação da combustibilidade de cinco carvões minerais em processos de injeção em altos-fornos via análises de caracterização e ensaios de combustão no Simulador de PCI do LaSid - UFRGS, comparando a combustibilidade de diferentes carvões a partir do efeito de suas propriedades químicas, físicas e petrográficas, em condições de taxa de aquecimento, pressão e tempo de residência próximas da injeção de carvão pulverizado em altos-fornos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização dos carvões

Foram selecionados cinco carvões pulverizados com diferentes *ranks*, sendo um carvão betuminoso alto volátil (AV), três carvões betuminosos baixo voláteis (BV1, BV2 e BV3) e um antracito (ANT).

As propriedades químicas, físicas e petrográficas dos carvões são fundamentais para o conhecimento de seus comportamentos combustíveis dentro de um processo de PCI, assim como para o próprio processo siderúrgico como um todo. Foi

realizada análise imediata (ASTM D 7582-15), elementar (ASTM D 5374-16), determinação do índice de inchamento livre (FSI – *Free Swelling Index*) (ASTM D720/D720M-15), e análises petrográficas (ASTM D 388-17, e ISO 7403-3/1984 e ISO 7404-5/1984).

2.2 Ensaios de combustão – Simulador de PCI

Para investigar a combustibilidade dos carvões e suas misturas sob condições similares às observadas no sistema de injeção dos altos-fornos, foi desenvolvido no Laboratório de Siderurgia da UFRGS um reator capaz de submeter o carvão a uma elevada taxa de aquecimento em um curto tempo de residência. A Figura 1 apresenta o esquema do simulador de PCI do LaSid com as configurações das temperaturas das unidades de aquecimento utilizadas no experimento.

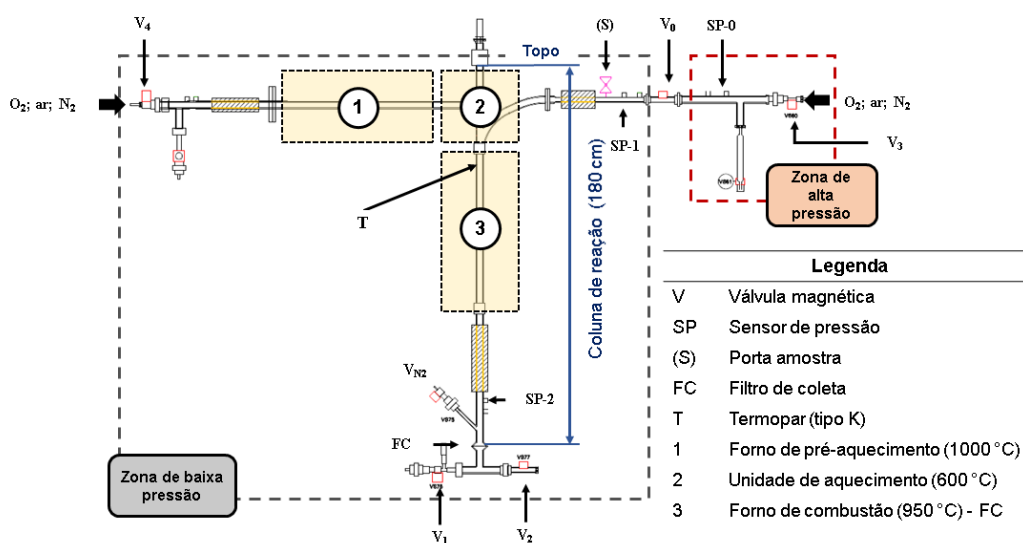


Figura 1. Esquema do simulador de PCI do LaSid-UFRGS [13].

O reator é composto por uma unidade de pré-aquecimento (1) que consiste em um forno resistivo em formato tubular seguido por um forno resistivo, que foi configurada para manter a temperatura a 1000 °C. A unidade de aquecimento (2) é composta por uma fita térmica capaz de manter a temperatura a 600 °C. A unidade de combustão (3) é composta por um forno tubular resistivo de inox mantido a uma temperatura de 950 °C. O ensaio é conduzido em oxigênio puro sob uma pressão de combustão de aproximadamente 2,4 bar. O reator se divide em duas regiões, a zona de alta pressão (ZAP) e a zona de baixa pressão (ZBP), que são separadas por uma válvula magnética (V₀). Antes do ensaio, a amostra é condicionada no porta amostra (S), localizada na ZBP. Durante o ensaio, quando a diferença de pressão entre as duas zonas atinge 2 bar, a válvula V₀ é aberta, o que gera um pulso de gás que sopra a amostra em direção ao forno de combustão, onde ocorre a queima do material injetado. Após a combustão, os resíduos sólidos do processo, denominados de *chars*, são retidos em um filtro de bronze sinterizado com abertura de 25 µm e imediatamente submetidos a apagamento com nitrogênio.

Os testes de combustão no simulador de PCI foram conduzidos com os carvões sob uma faixa granulométrica de 25-75 µm. Optou-se pela retirada de frações abaixo de 25 µm para mitigar o efeito da granulometria sobre a combustão. Os carvões foram submetidos a pelo menos 12 ensaios por carvão. A massa injetada foi de 750 mg.

O *burnout* foi calculado segundo o método traçador de cinzas de acordo com a Equação 1.

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

Onde $Cz_{\text{carvão}}$ e Cz_{char} representam o teor de cinzas do carvão e do *char* coletado, respectivamente. Os *chars* coletados em cada um dos ensaios foram misturados para compor pelo menos três grupos de no mínimo quatro ensaios cada. Cada grupo representa uma via do *burnout* calculado a partir da análise do teor de cinzas no analisador termogravimétrico LECO TGA 701, segundo as rampas de aquecimento definidas pela norma ASTM D 7582-15.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização dos carvões

A Tabela 1 apresenta os resultados da análise imediata e elementar, assim como os índices do inchamento livre (*Free Swelling Index – FSI*) determinados para os carvões estudados.

Tabela 1. Caracterização química (imediata e elementar) e física dos carvões estudados

Carvões	Análise Imediata (% , bs)			Análise Elementar (% , bsic)					Índice de inchamento livre (FSI)
	MV	Cz	Cf	C	H	N	S	O	
AV	37,1	4,0	58,8	85,3	5,6	1,4	2,9	4,8	3
BV1	20,4	10,4	69,3	90,7	4,6	2,2	0,4	2,2	1 ½
BV2	15,4	10,6	74,0	91,1	4,4	1,9	0,8	1,9	1 ½
BV3	14,9	10,8	74,3	89,1	4,5	2,1	0,4	3,9	1
ANT	6,2	9,5	84,3	94,2	1,8	1,0	1,1	1,9	1

O carvão AV apresentou o menor teor de cinzas dentre os carvões testados, sendo, portanto, um carvão constituído de baixas quantidades de matéria inorgânica. Dessa forma, a maior disponibilidade de matéria volátil para combustão por kg de material injetado tende a favorecer a eficiência de combustão quando considerada a injeção deste carvão. Os demais carvões apresentaram teores de cinzas na ordem de 10%, o que corresponde ao limite recomendado para injeção em alto-forno [14].

A análise elementar indicou que o carvão AV e o ANT apresentaram valores relativamente elevados de enxofre. Apesar das condições no interior do alto-forno serem favoráveis à dessulfuração, uma pequena parte ainda é incorporada ao gusa [15]. Assim, a injeção destes carvões, dependendo da taxa de injeção, devem considerar os custos adicionais referentes à dessulfuração.

A análise petrográfica revelou que, dos carvões estudados, dois (AV e BV2) são carvões individuais. A Tabela 2 apresenta a caracterização petrográfica dos carvões individuais.

Tabela 2. Caracterização petrográfica dos carvões individuais estudados

	AV	BV2
Vitrinita (% , imm)	90,3	68,9
Liptinita (% , imm)	7,2	-
Inertinita (% , imm)	2,5	31,2
MM ^a (%)	3,2	8,2
Rr ^b (%)	0,81	1,54

^aMatéria mineral; ^bRr – Refletância média da vitrinita

A composição da matéria orgânica dos carvões é dominada pelo grupo maceral da vitrinita, chegando a 90,3% no AV e 68,9% no BV2 em volume (base isenta de matéria mineral – imm). Os macerais do grupo da liptinita foram observados em maior volume no carvão AV (7,2%). O grupo da inertinita apresentou uma variação de 2,5 até 40,5% em vol., sendo o carvão AV com o menor teor.

Entretanto, a caracterização petrográfica também indicou que os carvões BV1, BV3 e ANT apresentaram uma heterogeneidade em suas composições macerais, revelando que, na realidade, são misturas de carvões constituídos por três ou quatro populações de carvões com distintas características petrográficas, ao contrário do que fora observado nos carvões AV e BV2. A Tabela 3 apresenta a distribuição das populações que compõem os carvões baixo volátil (BV1 e BV3) e o antracito (ANT).

Tabela 3. Caracterização petrográfica das misturas de carvões

	BV1				BV3				ANT		
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3
Prop.(%)	16,2	37,0	42,4	4,4	7,8	5,9	10,8	75,5	25,0	57,0	18,1
Rr (%)	0,71	0,99	1,39	1,84	0,73	1,04	1,42	1,74	4,09	4,89	6,24
Rank	HVB-B	HVB-A	MVB	LVB	HVB-B	HVB-A	MVB	LVB	-	-	-
V (% , imm)	7,9	17,6	27,0	3,0	4,9	3,5	7,5	38,7	23,9	54,7	17,5
L (% , imm)	2,1	1,4	-	-	1,2	-	-	-	-	-	-
I (% , imm)	6,3	18,1	14,5	1,4	1,8	2,4	3,3	36,7	1,0	2,3	0,6
MM(%)	2,5	4,1	4,1	0,6	1,0	1,4	3,6	7,9	1,0	0,8	0,2

Prop - Proporção na mistura (desconsiderando maceral não associado; Rr – Refletância média da vitrinita; HVB-B – Betuminoso alto volátil B; HVB-A – Betuminoso alto volátil A; MVB – Betuminoso médio volátil; LVB – Betuminoso baixo volátil; MM – Matéria mineral; V – Vitrinita; L – Liptinita; I – Inertinita; imm – isenta de matéria mineral.

O carvão BV1 também apresentou 4 populações de carvões. As refletâncias médias dessas populações variaram de 0,71% até 1,84%, porém, as populações de baixa refletância foram predominantes nesse carvão, representando aproximadamente 54% do carvão seguida pela população com refletância média intermediária (1,39%), compondo 42% da mistura. O carvão BV3 apresenta 4 populações distintas com valor médio de refletância de 1,56%. Os valores médios das populações variaram de

0,73 até 1,74%, sendo a população de maior refletância média a população predominante, com 73% da proporção na mistura. O carvão ANT é composto por 3 populações com refletâncias médias que variaram de 4,09 até 6,24%, sendo a população mais predominante apresentou uma refletância média de 4,89%.

3.2 Comportamento no simulador

A Figura 2 apresenta a relação entre o *burnout* médio e o teor de voláteis dos carvões testados no simulador de PCI e seus respectivos erros da estimativa estabelecidas segundo o método de comparações múltiplas de Bonferroni [16].

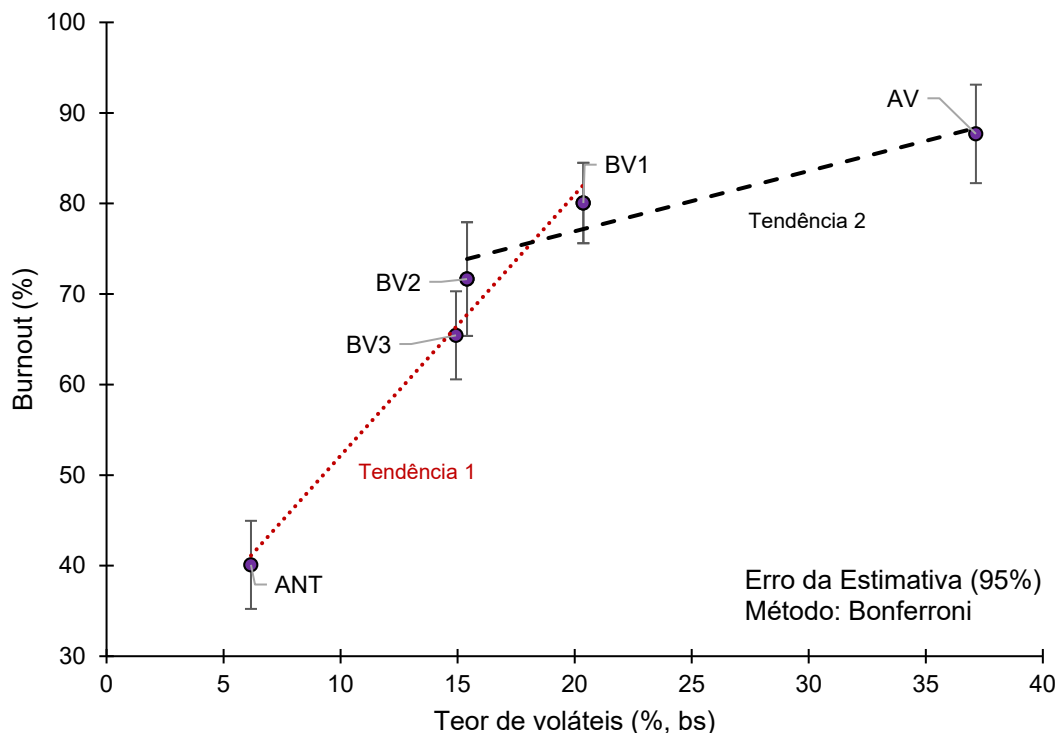


Figura 2. Correlação entre o *burnout* médio e o teor de voláteis dos carvões submetidos aos testes de combustão do simulador, com os respectivos desvios padrões.

O comportamento dos carvões após a sua passagem pelo simulador indicou que o *burnout* se relaciona com o teor de voláteis dos carvões de forma que quanto maior o teor de voláteis, maior é o *burnout*. Entretanto, essa relação apresentou duas diferentes tendências lineares, representadas pelas retas da Tendência 1 (intervalo de voláteis de 6% a 20%) e da Tendência 2 (intervalos de voláteis de 15% a 37%). Esse comportamento indica que o papel do teor voláteis no simulador de PCI, diminui com o aumento do teor de voláteis nos carvões, abrindo espaço para a contribuição de outras propriedades, como a composição física e petrográfica.

O carvão alto-volátil (AV) apresentou a melhor performance seguido pelos carvões baixo-voláteis (BV1, BV2 e BV3) e o antracito (ANT), apresentando a pior performance.

De um modo geral, o teor de voláteis do carvão é tomado como um dos principais parâmetros relacionados a sua combustibilidade [9]. Carvões com maiores teores de voláteis, e conseqüentemente de menor *rank*, tendem a apresentar uma maior combustibilidade. Esse comportamento tem sido enfaticamente relatado em testes

em diferentes simuladores de PCI [6], sendo geralmente atribuído à intensificação do processo de desvolatilização nos estágios iniciais da combustão [17], o que impacta em uma possível redução na temperatura de ignição do processo [18], bem como na tendência de gerar *chars* mais reativos [19]. A maior performance do carvão AV pode ser então atribuída ao seu rápido consumo nos estágios iniciais da combustão bem como na sua tendência em gerar um *char* mais reativo, favorecendo a condução das reações heterogêneas no forno de combustão do simulador. O baixo teor de cinzas e o elevado índice de inchamento também podem ser considerados fatores que influenciaram na maior performance do carvão AV. Em processos de PCI, o teor de cinzas exerce uma influência negativa na combustão em razão da sua capacidade de absorver calor, reduzindo a capacidade térmica global por unidade de massa de carvão [20]. Logo, o consumo energético na transferência de calor da combustão para a formação das cinzas neste carvão tende a ser menor, o que favorece a sua combustibilidade. Outra propriedade pertinente é que as altas taxas de aquecimento (na ordem entre 10^4 e 10^6 °C/s) como as que as partículas experimentam no simulador podem favorecer a extensão da desvolatilização, sendo este efeito mais pronunciado em carvões que apresentam índice de inchamento mais elevados [21], como é o caso do carvão AV, que apresentou o maior FSI. Entretanto, altos FSI's são comumente relacionados à possibilidade de bloqueio da lança de injeção e redução da eficiência [22].

Em contrapartida, a pior performance do antracito, dentre os carvões testados, é também atribuída ao seu alto *rank*. Antracitos tendem a ser menos reativos em razão da sua maior aromaticidade e baixa presença de grupos funcionais [23] [24]. Além do mais, os *chars* gerados tendem a ser menos reativos do que os carvões de menor *rank* [25] [26], o que reduz consideravelmente a sua performance no simulador.

O carvão BV1 foi o que apresentou a maior performance dentre os carvões baixo voláteis, sendo inclusive equiparável ao carvão AV. Em parte, esse comportamento pode ser atribuído ao seu teor de voláteis de 20,37%, superior aos apresentados pelos demais carvões baixo voláteis. Porém por outras propriedades também podem explicar a melhor performance. A distribuição da refletância da vitrinita das populações do carvão BV1 indica que o carvão é uma mistura composta por diferentes populações de carvões de forma que a população com refletância correspondente a de um carvão alto volátil representa 54,80% do carvão e a população de refletância intermediária, característica de um médio volátil, representa 41,68% (Tabela 3). Estudos em reatores de queda livre (*Drop Tube Furnace* - DTF com misturas de carvões alto e baixo volátil tem mostrado que a temperatura de ignição da mistura vai depender do carvão com maior teor de voláteis [27]. Logo, a população de menor *rank* do carvão BV1 deve sofrer ignição rapidamente, favorecendo o processo de combustão da porção de maior *rank* que, por ser de médio volátil, tende a favorecer a geração de *chars* mais reativos.

O carvão BV2, dentre os carvões baixo voláteis, foi o que apresentou uma performance considerada intermediária, não indicando diferença significativa nos testes no simulador em relação ao carvão BV1. Mesmo possuindo um *rank* maior, (Tabela 2), a sua performance média foi ligeiramente inferior, o que pode estar associado tanto ao seu menor teor de voláteis, à maior refletância da vitrinita ou ao maior teor de inertinita, geralmente associados a uma baixa reatividade na combustão [28].

O carvão BV3 foi o que apresentou a pior performance dentre os carvões baixo voláteis. Na comparação com o carvão BV2, o carvão BV3 apresentou o maior

volume de inertinita, influenciando seu menor *burnout*. Além disso, a análise da Tabela 3 revela que o carvão BV3 é composto por uma mistura envolvendo 4 populações de carvões, de maneira que a população predominante apresenta uma refletância média relativamente elevada, de 1,74. Durante a combustão, a população de maior *rank* desse carvão pode apresentar uma maior dificuldade de sofrer ignição, o que pode ter influenciado negativamente na sua performance.

A composição maceral dos carvões tem um papel relevante para explicar a performance do carvão na combustão, principalmente em situações em que o teor de voláteis não explica integralmente o comportamento do carvão no processo de combustão. Porém, como visto na análise dos carvões BV1 e BV3, a relação direta entre a composição maceral do carvão e a sua performance na combustão não é uma tarefa simples, pois além da composição maceral, uma série de outros fatores parecem contribuir para o comportamento do carvão na combustão, como a refletância dos grupos macerais de suas populações e a associação tanto entre os diferentes macerais (microlitotipos) como entre os macerais com a matéria mineral.

4 CONCLUSÃO

A maior disponibilidade de matéria volátil dos carvões AV para combustão por kg de material injetado tende a favorecer a eficiência de combustão quando considerada a injeção destes carvões.

A análise elementar indicou que os carvões AV e ANT apresentaram valores relativamente elevados de enxofre, logo, seu uso na injeção, dependendo da taxa implementada, deve considerar os custos adicionais referentes a dessulfuração.

O comportamento dos carvões após a sua passagem pelo simulador indicou que o *burnout* se relaciona com o teor de voláteis dos carvões de forma que quanto maior o teor de voláteis, maior é o *burnout* dos carvões. Essa relação apresentou duas diferentes tendências lineares, indicando que no simulador de PCI o papel do teor de voláteis diminui com o aumento do *rank* do carvão. O carvão AV apresentou a maior performance enquanto o antracito indicou o menor *burnout*.

Os carvões baixo voláteis demonstraram performances intermediárias, porém, o teor de voláteis não fora suficiente para explicar integralmente o comportamento desses carvões. O carvão BV1 indicou o maior *burnout* médios entre os carvões baixo voláteis. A análise petrográfica revelou que o carvão BV1 se trata de uma mistura de carvões em que a população predominante corresponde a um carvão médio volátil. O carvão BV2 apresentou uma performance intermediária enquanto o BV3 fora o carvão com a pior performance, por se tratar de uma mistura de carvões cuja população predominante corresponde a de um carvão com refletância relativamente elevada.

A associação das análises das propriedades dos carvões com o ensaio de combustão no simulador demonstrou a sua capacidade em distinguir quantitativamente e qualitativamente as performances de diferentes carvões para injeção.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – processo 88887.474216/2020-00) e à empresa ArcelorMittal pelo apoio e incentivo financeiros.

REFERÊNCIAS

- 1 Bösenhofer M, Wartha E-A, Jordan C, Feilmayr C, Stocker H, Hauzenberger F, Rieger J, Tjaden S, Walk A, Harasek M. Suitability of pulverized coal testing facilities for blast furnace applications. *Ironmaking & Steelmaking*. 2020;47(5): 574-585.
- 2 Osorio E, Ghiggi MLF, Vilela ACF, Kalkreuth WD, Borrego AG. Non-isothermal combustion behavior of coal blends in a thermobalance as seen by optical microscopy. *Thermochimica Acta*. 2008;475(1-2):1-7.
- 3 Sahu SG, Mukherjee A, Kumar M, Adak AK, Sarkar P, Biswas S, et al. Evaluation of combustion behaviour of coal blends for use in pulverized coal injection (PCI). *Applied Thermal Engineering*. 2014;73(1):1014-21.
- 4 Pohlmann JG, Osório E, Vilela ACF, Diez MA, Borrego AG. Pulverized combustion under conventional (O_2/N_2) and oxy-fuel (O_2/CO_2) conditions of biomasses treated at different temperatures. *Fuel Processing Technology*. 2017; 155(1):174-182.
- 5 Tiwari HP, Das A, Singh U. Novel technique for assessing the burnout potential of pulverized coals/coal blends for blast furnace injection. *Applied Thermal Engineering*. 2018;130(1):1279-1289.
- 6 Mathieson JG, Truelove JS, Rogers H. Toward an understanding of coal combustion in blast furnace tuyere injection. *Fuel*. 2005;84(10):1229-1237.
- 7 Assis CFC, Leal EA, Assis PS, Nascimento LM, Konishi H, Usui T. Experimental analysis of injecting different blends of biomass materials and charcoal in a blast furnace. *Ironmaking & Steelmaking*. 2020;47(3):284-289
- 8 Kawashima T, Murao A, Yamamoto N, Ando M, Okada J, Watanabe H. Prediction of pulverized coal combustion behavior around tuyere by using LES and extended CPD model. *ISIJ International*. 2020;60(5): 905-914.
- 9 Hutny WP, Lee GK, Price JT. Fundamentals of coal combustion during injection into a blast furnace. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1991;17(4):373-95.
- 10 Wall TF, Liu G, Wu H-W, et al. The effects of pressure on coal reactions during pulverized coal combustion and gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2002;8(5):405-433.
- 11 Babich A; Senk, D, Born S. Interaction between co-injected substances with pulverized coal into the blast furnace. *ISIJ International*. 2014;54(12): 2704-2712.
- 12 Kim J, Kim R-G, Kim G-B, Jeon CH. Effect of coal fragmentation on PCI combustion zone in blast furnace. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016;79(1): 266-274.
- 13 Fragoso, H. P. Avaliação da combustibilidade de carvões em simulador de PCI: evolução da metodologia de operação. Dissertação - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2019.
- 14 Carpenter AM. Use of PCI in blast furnaces. London: IEA Coal Research; 2006.
- 15 Babich A, Senk D, Gudenau HW, Mavrommatis KT. *Ironmaking: textbook*. Aachen: RWTH Aachen University; 2008.
- 16 Devore JL. *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*. San Louis: Cengage Learning; 2015.
- 17 Khairil K, Kamihashira D, Nakayama K, Naruse I. Fundamental reaction characteristics of pulverized coal at high temperature. *ISIJ International*. 2001;41(2):136-141.
- 18 Zhang D-K, Wall TF, Harris DJ, Smith IW, Chen J, Stanmore BR. Experimental studies of ignition behavior and combustion reactivity of pulverized fuel particles. *Fuel*. 1992;71(11): 1239-1246.
- 19 Khatami R, Levendis YA. An overview of coal rank influence on ignition and combustion phenomena at the particle level. *Combustion and Flame*. 2016;164(1):22-34.
- 20 Kurose R, Ikeda M, Makino, H. Combustion characteristics of high ash coal in a pulverized coal combustion. *Fuel*. 2001;80(10): 1447-1455.
- 21 Chen W-H, Du S-W; Yang T-H. Volatile release and particle formation characteristics of injected pulverized coal in blast furnaces. *Energy Conversion and Management*. 2007;48(7): 2025-2033.
- 22 Bennet PA. *Advantages of Low Volatile Coals for PCI*. Austrália: Coal Tech; 1997.

- 23 Davidson RM, Iea Coal Research, Clean Coal Centre. Studying the structural chemistry of coal. Londres: IEA Coal Research, Clean Coal Centre, 2004.
- 24 Faúndez J, et al. Ignition Behaviour of Different Rank Coals in an Entrained Flow Reactor. Fuel, 2005;84(17): 2172–2177.
- 25 Lester E, Cloke M. The characterization of coals and their respective chars formed at 1300 °C in a drop tube furnace. Fuel, 1999;78(14): 1645-1658.
- 26 Borrego AG, Martín AJ. Variation in the structure of anthracite at a fast heating rate as determined by its optical properties: An example of oxy-combustion conditions in a drop tube reactor. International Journal of Coal Geology. 2010;81(4): 301-308.
- 27 Su S, Pohl JH, Holcombe D, Hart JA. Techniques to determine ignition, flame stability and burnout of blended coals in p.f. power station boilers. Progress in Energy and Combustion Science. 2001;27(1): 75-98.
- 28 Cloke M, Lester E. Characterization of coals for combustion using petrographic analysis: A review. Fuel. 1994;73(3): 315-320.