

COMBUSTIBILIDADE DE MISTURAS DE CARVÃO BRASILEIRO E IMPORTADOS EM SIMULADOR DE PCI*

Claudia Caroline Teixeira Barbieri¹
Hector Alejandro Picarte Fragoso²
Juliana Gonçalves Pohlmann³
Guilherme Liziero Ruggio da Silva⁴
Antônio Cezar Faria Vilela⁵
Eduardo Osório⁶

Resumo

Este trabalho teve como objetivo avaliar a combustibilidade de misturas carvão nacional, do estado do Rio Grande do Sul, para injeção em altos-fornos. O estudo foi realizado através de ensaios de combustão no simulador de PCI do Laboratório de Siderurgia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LaSid/UFRGS). Os carvões empregados foram carvão nacional, carvões importados e misturas destes tendo o baixo volátil importado como base. Os resultados mostraram que a combustibilidade medida pelo *burnout* foi proporcional ao teor de matéria volátil. Foi verificado efeito sinérgico nas misturas, onde o carvão alto volátil (CC) exerceu uma maior interação com o carvão base baixo volátil (CA) do que o carvão brasileiro (CB). Uma adição de 10% de CC proporcionou uma eficiência de combustão na mistura CA:CC superior a uma adição de até 30% de CB na mistura CA:CB. A partir de 30% de CC e 50% de CB não houve variação significativa nas eficiências de combustão em relação aos carvões individuais CC e CB.

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

COMBUSTIBILITY OF BRAZILIAN COAL BLENDS FOR INJECTION IN PCI RIG

Abstract

This work aimed to evaluate the combustibility Brazilian coal blends, from state of Rio Grande do Sul, for injection in blast furnaces. The study was carried out by combustion tests in the PCI rig of the Steelmaking Laboratory of the Federal University of Rio Grande do Sul (LaSid/UFRGS). Coals used were Brazilian coal, imported coals and blends of these employing the imported volatile low as base. The results showed that combustibility measured by burnout was proportional to volatile matter content. It was verified a synergic effect in the blends tested, where the high volatile coal (CC) exerted a greater interaction with low volatile coal (CA) than with Brazilian coal (CB). An addition of 10% CC provided a combustion efficiency in the CA: CC blend above an addition of up to 30% CB in the CA: CB blend. From 30% CC and 50% CB there was no significant variation in combustion efficiencies in relation to individual coals CC and CB.

Keywords: Brazilian coal; PCI; Combustion; PCI rig

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

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

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

⁴ *Doutor, Gerdau Açominas, Ouro Branco, MG, Brasil.*

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

⁶ *Professor Dr., Laboratório de Siderurgia (LaSid) da UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o 10º maior produtor de aço do mundo, com uma produção de cerca de 34,4 milhões de toneladas em 2017, segundo o Instituto Aço Brasil. Praticamente todo o carvão utilizado na siderurgia provém de importação, sendo 21 milhões de toneladas de carvões coqueificáveis e 4 milhões de toneladas para injeção em altos-fornos (1). Neste cenário, o carvão nacional surge como uma alternativa à dependência integral dos carvões importados para injeção nos altos-fornos. A maior parte das reservas de carvão no Brasil estão localizadas na região sul do País. Esses carvões são classificados como sub-betuminosos e tem um elevado teor de inertes. Estudos sobre as propriedades desses carvões mostraram que podem ser injetados no alto-forno na forma de misturas com carvões importados (2–7).

A injeção de carvão pulverizado (PCI, *Pulverized Coal Injection*) é uma prática comum nos altos-fornos modernos e visa a redução do consumo de coque e aumento da produtividade do alto-forno (8). A combustão do carvão no alto-forno é um processo complexo que envolve a interação do combustível com o sopro de ar pressurizado a alta temperatura, a qual inicia na saída do carvão da lança de injeção e encerra na zona de combustão. Em função do tempo de residência ser da ordem de 20 ms o processo inevitavelmente gera um resíduo incombusto denominado *char*. Apesar do *char* ser consumido no interior do reator, elevados teores de material incombusto subindo com os gases em contracorrente com a carga prejudicam a permeabilidade do alto-forno, provocando problemas relacionados à distribuição dos gases e da temperatura, podendo também alterar a forma da zona coesiva e gerar perdas de combustível pelo arraste parcial desse *char* para o topo (9).

De uma maneira geral, o teor de voláteis dos carvões é um dos principais parâmetros de seleção de carvões para PCI. Carvões com baixo teor de voláteis tendem a apresentar uma maior razão de substituição, maior poder calorífico e proporcionam uma maior temperatura de chama, enquanto que os carvões com maior teor de voláteis apresentam uma maior eficiência de combustão quando comparados com os carvões baixo voláteis, entretanto, eles estão relacionados à redução da estabilidade da zona de combustão e a uma maior geração de finos de coque (10,11).

A injeção de misturas de carvões em altos-fornos é uma prática comum que visa aumentar a combustibilidade de carvões de alto *rank* e/ou realizar um ajuste químico de carvões que individualmente seriam inadequados para uso em PCI. A avaliação da combustibilidade de misturas depende tanto das propriedades dos carvões como das condições de combustão. Artos e Scaroni (1993) (12) em testes com misturas no DTF a 900 °C constataram o comportamento aditivo da eficiência de combustão com a variação das proporções dos carvões na mistura. Du *et al.* (2010) (13) também relataram um comportamento aditivo, indicando assim que não houve sinergia entre os carvões que constituíram as misturas. Sahu *et al.* (2014) (14) por outro lado observaram um comportamento sinérgico em misturas com carvões alto volátil e baixo volátil. Carpenter (1995) (15) fez uma revisão sobre o comportamento de misturas de carvões em combustão em diferentes equipamentos e relatou que dependendo das condições e dos tipos de carvões a mistura pode apresentar um comportamento sinérgico ou não, com desvios tantos positivos como negativos.

A eficiência de combustão dos carvões e misturas são afetados pelas propriedades dos carvões, condições de combustão e pelo desenho do reator utilizado (11,16). Desta forma, para a avaliação da combustibilidade de carvões para PCI faz-se

necessário a realização de testes em condições que se aproximem das condições de combustão observadas no alto-forno.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a combustibilidade de um carvão nacional, carvões importados tipicamente utilizados em PCI e suas misturas para injeção em altos-fornos no Simulador de PCI do Laboratório de Siderurgia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Carvões e misturas

Foram utilizados um carvão brasileiro alto volátil (CB) proveniente da mina de Leão II (RS) submetido a beneficiamento prévio para redução do teor de cinzas e dois carvões importados, um alto volátil (CC) e um baixo volátil (CA). A partir dos carvões individuais foram elaboradas misturas em três proporções do carvão baixo volátil (CA) como base (90%, 70% e 50%) com os carvões alto voláteis (CB) e (CC). Isto foi feito para que fosse possível comparar o carvão brasileiro a um carvão de teor de matéria volátil semelhante, já utilizado para PCI (CC). A caracterização dos carvões e suas misturas por análise imediata (ASTM D 7582-15) e elementar (ASTM D 5373 – 16) é apresentada na Tabela 1 e na Tabela 2 está a caracterização petrográfica (ASTM D 388-17, ISO 7404/5 (1984) e ISO 7403-3/1984).

Tabela 1. Caracterização das amostras

Amostra	Análise Imediata (bs)			Análise Elementar (bsic)				
	MV (%)	Cz (%)	Cf (%)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S _{Total} (%)
CA	15,4	10,6	74,0	91,1	4,3	1,9	1,9	0,8
CB	32,3	18,9	48,8	78,6	5,1	1,3	14,3	0,7
CC	38,0	10,8	51,2	82,5	5,6	1,8	9,3	0,9
CA:CB 90:10	17,1	11,4	71,5	89,1	4,3	1,8	3,9	0,8
CA:CB: 70:30	20,5	13,1	66,4	86,2	4,5	1,7	6,9	0,8
CA:CB 50:50	23,9	14,8	61,4	83,4	4,6	1,6	9,7	0,7
CA:CC 90:10	17,7	10,6	71,7	89,5	4,4	1,9	3,4	0,8
CA:CC 70:30	22,2	10,7	67,2	87,6	4,7	1,9	5,1	0,8
CA:CC 50:50	26,7	10,7	62,6	85,7	4,9	1,8	6,7	0,8

bs – base seca; bsic – base seca isenta de cinzas; MV – matéria volátil; Cz – cinzas; Cf – carbono fixo

Tabela 2. Análise petrográfica dos carvões individuais

Carvão	CA	CB	CC
Rr (%)	1,54	0,46	0,61
Classificação ASTM	BBV	SB-B	SB-A
Vitrinita (imm %)	68,8	58,8	82,7
Inertinita (imm%)	31,2	23,5	14,7
Liptinita (imm %)	-	17,6	2,6
Matéria mineral (%)	8,2	11,6	6,2

Imm – isento de matéria mineral

O limite superior usualmente praticado para o teor de cinzas de um carvão/mistura para injeção é de cerca de 10% (17). Ambos carvões CA e CC, já utilizados para PCI, apresentaram individualmente e em misturas um teor de cinzas adequado para injeção. A incorporação do carvão brasileiro em misturas com o carvão CA aumentou proporcionalmente o teor de cinzas, de forma que a mistura com 10% de participação do carvão brasileiro já está próxima deste limite (Tabela 1). Todas as amostras encontram-se com teor de enxofre inferior a 1%, um pré-requisito de carvões para injeção. O teor de matéria volátil das misturas aumentou com a proporção de carvão alto volátil adicionado, conforme o esperado.

A análise petrográfica revelou predominância de macerais do grupo da vitrinita para todos os carvões. Devido ao maior *rank* do carvão CA ($R_r = 1,54\%$) espera-se a menor combustibilidade para esta amostra. CB e CC são carvões de baixo *rank*, (refletâncias da vitrinita de 0,46% e 0,61%, respectivamente) e, como tal, são esperadas combustibilidades elevadas.

2.2. Ensaio de combustão em 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. O esquema do simulador de PCI do LaSid é apresentado na Figura 1 e sua descrição completa pode ser consultada no trabalho de Rech *et al.* (2018) (18).

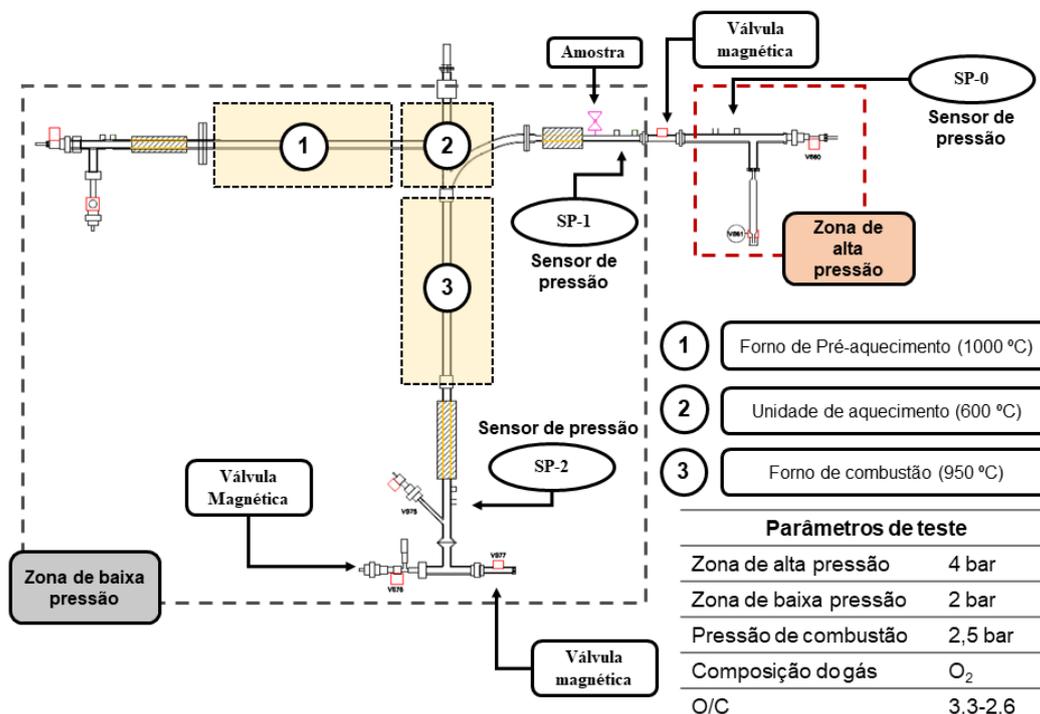


Figura 1. Esquema do simulador de PCI do LaSid/UFRGS

As zonas de baixa pressão e de alta pressão foram pressurizadas a 2 e 4 bar, respectivamente. No início do ensaio, um pulso de gás foi gerado com a abertura da válvula magnética que separa essas duas zonas, soprando a amostra em direção ao forno de combustão. Os resíduos da combustão (*chars*) foram retidos em um filtro poroso de bronze e resfriados com nitrogênio, para evitar o prosseguimento da

conversão. Os testes neste trabalho foram conduzidos sob excesso de oxigênio para se alcançar a máxima eficiência de combustão no processo. Cada um dos carvões e suas misturas foram submetidos a 12 ensaios, em que cada ensaio era composto por 750 mg de amostra com uma faixa granulométrica de 36-75 μm . Os *chars* coletados em cada um dos testes foram agrupados em três grupos de 4 ensaios cada, a partir dos quais se realizou a análise química para o cálculo do *burnout* pelo método traçador de cinzas (Equação 1), que é uma forma indireta de se avaliar a eficiência de combustão em que se assume que não há perda de cinzas no processo (19,20).

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

Onde $Cz_{\text{carvão}}$ é o teor de cinzas do carvão e Cz_{char} representa o teor de cinzas do *char* coletado. Os *chars* retidos no filtro de coleta foram avaliados para determinação do teor de cinzas em uma termobalança LECO TGA 701 segundo a norma ASTM D 7582-15.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 apresenta a relação entre o teor de voláteis dos carvões e suas misturas com o *burnout* calculado através do método traçador de cinzas. Os carvões individuais com teores de voláteis mais elevados (CC com 37% de voláteis e CB com 32%) apresentaram os maiores *burnouts* enquanto o carvão de maior *rank* (CA) teve o menor *burnout*. O teor de voláteis do carvão é um dos principais parâmetros que afetam a eficiência de combustão, pois afeta tanto a temperatura de ignição e estabilidade da chama (16,21,22) como a morfologia do *char* gerado no processo (23).

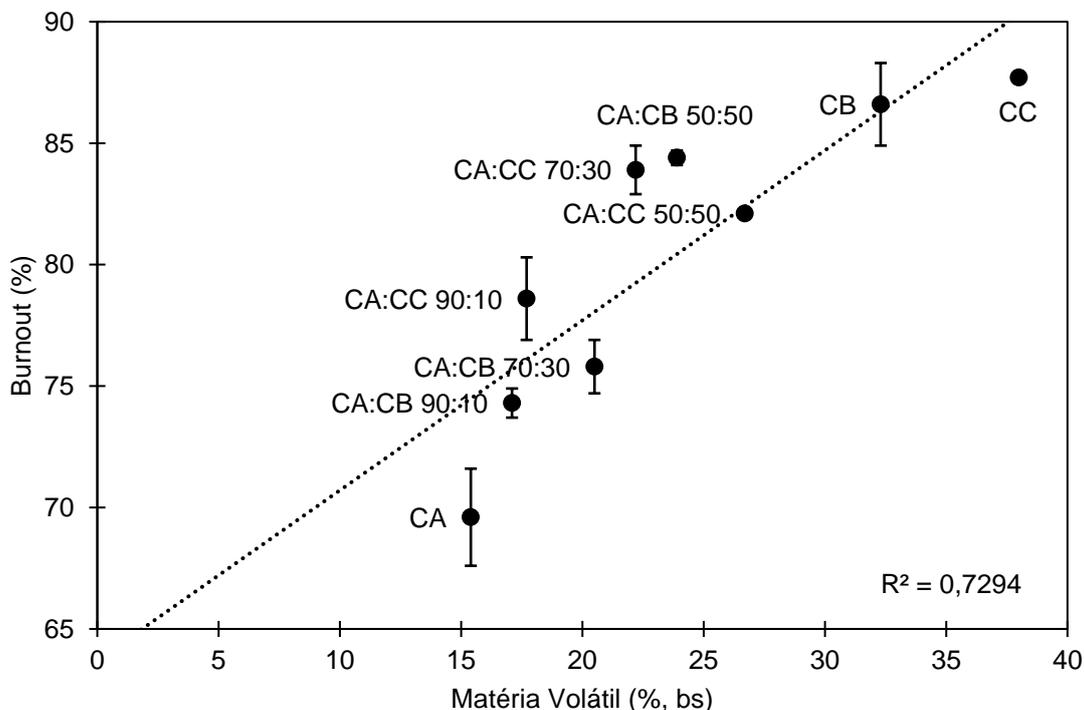


Figura 2. Relação entre os teores de matéria volátil e os *burnouts* alcançados

As misturas seguiram uma tendência de aumento do *burnout* com o aumento do teor de voláteis. No entanto, as misturas CA:CB e CA:CC não apresentaram uma relação linear entre a eficiência de combustão e o teor de voláteis da mistura, o que refletiu no coeficiente de determinação (R^2), indicando que outros fatores contribuem para o comportamento das misturas além do seu teor de voláteis.

A Figura 3 apresenta a relação entre o *burnout* e o *Fuel Ratio* (FR) das misturas. O FR é um índice definido como a razão entre o teor de carbono fixo e o teor de voláteis do carvão, determinados pela análise imediata. Esse índice é uma indicação da proporção relativa de *char* em relação aos voláteis (16) sendo também comumente relacionado à performance do carvão na combustão, de maneira que quanto maior o FR menor é a eficiência de combustão (24). As relações entre os *burnouts* e o FR mostram que as misturas CA:CB e CA:CC se comportam de maneiras distintas à medida que a proporção dos carvões CB e CC diminuem nas misturas. As misturas CA:CB tendem a apresentar *burnouts* relativamente inferiores aos das misturas CA:CC com o aumento do FR. À medida que a proporção de CB diminui na mistura, a queda da eficiência de combustão tende a ser mais intensa e se aproxima da do carvão base mais rapidamente. Isso indica que a sua capacidade em melhorar a performance de combustão do carvão CA é menor do que a do carvão CC. Os coeficientes de determinação sugerem que os efeitos sinérgicos nas misturas CA:CC são maiores do que nas misturas CA:CB.

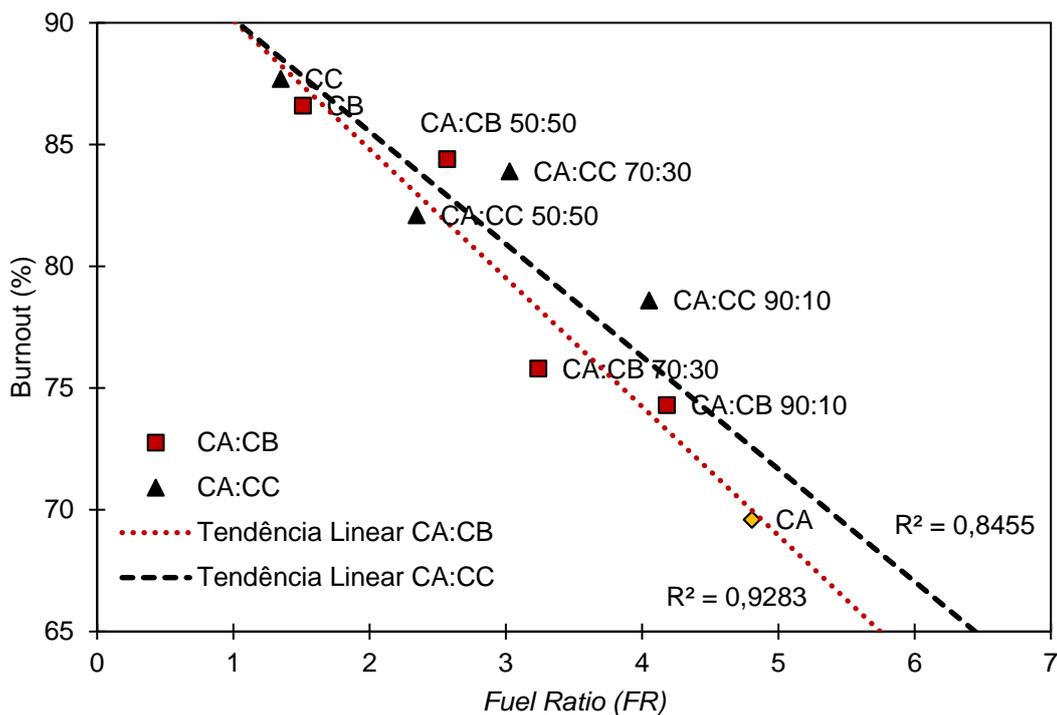


Figura 3. Relação entre o *fuel ratio* das amostras e o *burnout*

A Figura 4 apresenta a evolução experimental e calculada do *burnout* com o aumento da proporção dos carvões CB e CC nas misturas com o carvão CA. As misturas CA:CB com 10% e 30% de CB apresentaram *burnouts* ligeiramente superiores aos valores calculados, indicando pouco efeito sinérgico na combustão de ambos os carvões na mistura. Conseqüentemente, o impacto do carvão CB na eficiência de combustão quando misturado ao CA, em pequenas proporções, é relativamente pequeno. Sob uma proporção de 50% de CB o *burnout* apresentou um

valor bem superior ao previsto pela eficiência de combustão calculada, sendo até similar à performance observada pelo carvão individual CB. Esse desvio positivo do *burnout* em relação ao valor calculado é um indicativo de que houve uma forte interação sinérgica entre as partículas de carvões de diferentes *ranks* na mistura.

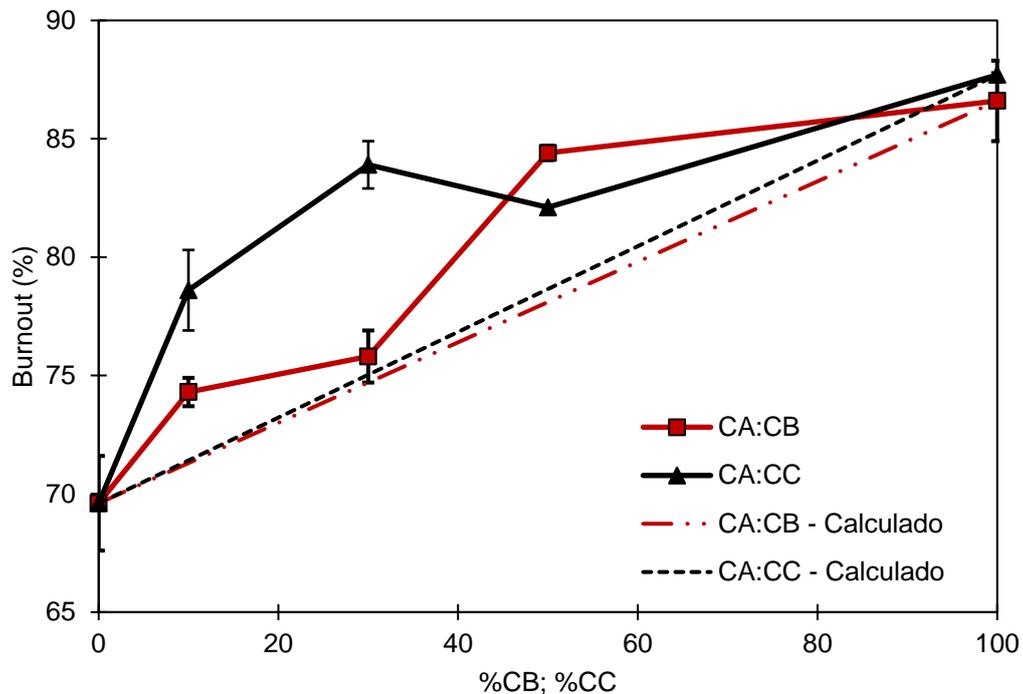


Figura 4. Evolução experimental e calculada do *burnout* com o aumento da proporção dos carvões CB e CC nas misturas com o carvão CA

As misturas CA:CC com 10% e 30% de CC apresentaram *burnouts* superiores aos valores calculados, de maneira que o carvão CC, mesmo em pequenas proporções, favoreceu a combustão do carvão CA. Na comparação entre as duas misturas, CA:CB e CA:CC, foi constatado que com 30% de CC na mistura o *burnout* atingiu valores próximos ao do carvão individual CC, enquanto que na mistura envolvendo o carvão CB esse comportamento só foi observado com uma adição de 50% deste carvão.

A menor combustibilidade das misturas com 10 e 30% do carvão CB em relação às mesmas misturas com o carvão CC pode ser explicada pela diferença no *rank* e pelo teor de voláteis dos carvões CB e CC. No geral, carvões de *ranks* mais baixos, tendem a apresentar maiores teores de umidade (25) e geram voláteis com maiores proporções de gases inertes (9), o que reduz a temperatura de ignição e a estabilidade da chama na combustão dos voláteis (24). O carvão CB e CC apresentam refletâncias médias da vitrinita de 0,46% e 0,61% e teores de voláteis de 32,3% e 38,0%, respectivamente. Assim, uma hipótese para a razão das diferenças no comportamento do carvão CB e CC nas misturas é que quando o carvão CB está presente nas misturas em baixas proporções (menores que 50%) o calor gerado na sua combustão talvez não seja suficiente para que o carvão CA sofra ignição ou afete de maneira muito significativa o seu comportamento no processo.

4 CONCLUSÕES

Dentre os carvões individuais testados, o carvão base (CA), um baixo volátil, apresentou o menor *burnout* enquanto os carvões com maiores teores de voláteis, o carvão brasileiro (CB) e o importado (CC) apresentaram a maior eficiência de combustão. O CB apresentou uma eficiência de combustão um pouco menor do que o carvão CC. As misturas (CA:CC e CA:CB) apresentaram uma tendência de aumento do *burnout* com o aumento da proporção do carvão CB e CC, porém, a mistura envolvendo o CB apresentou uma maior queda do *burnout* com a redução da sua proporção na mistura. Esse comportamento sinalizou que o carvão CC exerceu uma maior interação com o carvão base CA do que o carvão brasileiro. A mistura com 10% de carvão CC proporcionou uma eficiência de combustão superior a uma mistura com 30% de carvão brasileiro. A hipótese para essa diferença entre as misturas CA:CC e CA:CB está relacionado ao menor rank e teor de voláteis do carvão CB em relação ao carvão CC. A partir de 30% de CC e 50% de CB não houve variação significativa das eficiências de combustão em relação aos carvões individuais CC e CB.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – processo 154141/2018-6) e a GERDAU pelo incentivo financeiro.

REFERÊNCIAS

1. IABR. Anuário Estatístico/Instituto Aço Brasil. 2017.
2. Kalkreuth W, Borrego A, Alvarez D, Menendez R, Osorio E, Ribas M, et al. Exploring the possibilities of using Brazilian subbituminous coals for blast furnace pulverized fuel injection. *Fuel*. abril de 2005;84(6):763–72.
3. Barbieri CCT, Osório E, Vilela ACF. Combustibility and reactivity of coal blends and charcoal fines aiming use in ironmaking. *Mat Res*. 8 de abril de 2016;19(3):594–601.
4. Osório E, de Lourdes Ilha Gomes M, Vilela ACF, Kalkreuth W, de Almeida MAA, Borrego AG, et al. Evaluation of petrology and reactivity of coal blends for use in pulverized coal injection (PCI). *International Journal of Coal Geology*. agosto de 2006;68(1–2):14–29.
5. Osorio E, Ghiggi MLF, Vilela ACF, Kalkreuth WD, Borrego AG. Non-isothermal combustion behaviour of coal blends in a thermobalance as seen by optical microscopy. *Thermochimica Acta*. setembro de 2008;475(1–2):1–7.
6. Machado JGMS, Osório E, Vilela ACF, Babich A, Senk D, Gudenau HW. Reactivity and Conversion Behaviour of Brazilian and Imported Coals, Charcoal and Blends in view of their Injection into Blast Furnaces. *steel research international*. janeiro de 2010;81(1):9–16.

7. Barbieri CCT. Avaliação da combustibilidade de carvão brasileiro para injeção em altos-fornos em simulador de PCI e em termobalança [Tese de doutorado]. [Porto Alegre]: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2018.
8. Babich A, Senk D, Gudenau HW, Mavrommatis KTh. Ironmaking: textbook. Aachen: RWTH Aachen University; 2008. 402 p.
9. Hutny WP, Giroux JL, MacPhee A, Price JT. Quality of coal for blast furnace injection. In Cleveland (OH), EUA; 1996.
10. Atkinson CJ, Willmers RR. Blast furnace coal injection studies using a single tuyere raceway investigation rig. Fuel Processing Technology. janeiro de 1990;24:107–15.
11. Hutny WP, Lee GK, Price JT. Fundamentals of coal combustion during injection into a blast furnace. Progress in Energy and Combustion Science. janeiro de 1991;17(4):373–95.
12. Artos V, Scaroni AW. T.g.a. and drop-tube reactor studies of the combustion of coal blends. Fuel. julho de 1993;72(7):927–33.
13. Du S-W, Chen W-H, Lucas JA. Pulverized coal burnout in blast furnace simulated by a drop tube furnace. Energy. fevereiro de 2010;35(2):576–81.
14. 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. dezembro de 2014;73(1):1014–21.
15. Carpenter AM. Coal blending for power stations. London: IEA Coal Research; 1995.
16. 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. janeiro de 2001;27(1):75–98.
17. Carpenter AM. Use of PCI in blast furnaces. London: IEA Coal Research; 2006.
18. Rech RL, Machado A da S, Barbieri CCT, Pohlmann JG, Machado JGMS, Bagatini MC, et al. Design and construction of a PCI rig evaluation of pulverized fuels combustion: equipment features. Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração. 2018;15(4):496–503.
19. Badzioch S, Hawksley PGW. Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development. outubro de 1970;9(4):521–30.
20. Kobayashi H. Devolatilization of Pulverized coal at high temperatures. Thesis. Massachusetts Institute of Technology; 1976.
21. Oka N, Murayama T, Matsuoka H, Yamada S, Yamada T, Shinozaki S, et al. The influence of rank and maceral composition on ignition and char burnout of pulverized coal. Fuel Processing Technology. janeiro de 1987;15:213–24.

22. Khatami R, Levendis YA. An overview of coal rank influence on ignition and combustion phenomena at the particle level. *Combustion and Flame*. fevereiro de 2016;164:22–34.
23. 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*. julho de 2007;48(7):2025–33.
24. Carpenter AM. *Coal quality assessment: the validity of empirical tests*. London: IEA Clean Coal Centre; 2002. 100 p. (CCC / IEA Coal Research).
25. Stach E, Murchison G, organizadores. *Stach's textbook of coal petrology*. 3., rev. and enlarged ed. Berlin, Stuttgart: Borntraeger; 1982. 535 p.