

# AVALIAÇÃO DO USO DE CARVÃO BRASILEIRO (BARRO BRANCO) NA FABRICAÇÃO DE COQUE METALÚRGICO\*

Bruno Deves Flores<sup>1</sup>  
Anderson Azevedo Agra<sup>2</sup>  
Matheus Frederico Rückert<sup>3</sup>  
Luiz Guilherme Schander<sup>3</sup>  
Matheus Teixeira Fraga<sup>2</sup>  
Guilherme Liziero Ruggio da Silva<sup>4</sup>  
Antônio Cezar Faria Vilela<sup>5</sup>  
Eduardo Osório<sup>5</sup>

## Resumo

O presente estudo visou avaliar em escala laboratorial os efeitos da substituição de carvão importado por nacional em misturas típicas para fabricação de coque metalúrgico. Carvão da camada Barro Branco foi amostrado, beneficiado e caracterizado. Misturas entre carvões coqueificáveis importados, coque de petróleo e o carvão brasileiro foram produzidas de modo a permitir a avaliação da influência do carvão nacional na qualidade do coque. O coque gerado no estudo foi produzido em escala de laboratório e posteriormente avaliado a partir de testes de resistência mecânica e reatividade. Os resultados do estudo apontam que a substituição parcial de carvão importado por nacional é viável tecnicamente sem que ocorram prejuízos importantes à qualidade do coque gerado. As diferenças de qualidade dos coques produzidos com ou sem carvão nacional foram menores para misturas com alto teor de inertes, onde as características termoplásticas da mistura passam a controlar a qualidade do coque gerado.

**Palavras-chave:** coque, carvão brasileiro, carvão Barro Branco, propriedades termoplásticas, qualidade de coque

## ASSEMENT OF BRAZILIAN COAL (BARRO BRANCO) FOR COKE MAKING

### Abstract

The present study aimed at evaluating on a laboratory scale the effects of imported coals substitution by Brazilian coal for coke production. Coal from Barro Branco seam was sample, beneficiated and characterized. Blends of imported coking coals, petroleum coke and Brazilian coal were produced in order to evaluate the influence of Brazilian coal on the quality of coke. The coke was produced in a laboratory scale and later evaluated from mechanical strength and reactivity test. The results of the study indicate that the partial substitution of imported coal by Brazilian coal is technically feasible without causing significant losses on the coke quality. The differences in the quality of the cokes produced with or without Brazilian coal were lower for blends with high inert content, where the thermoplastic characteristics of the coal blends become a controlling factor of coke quality.

**Keywords:** coke, cokemaking, Brazilian coal, Barro Branco coal, thermoplastic properties, coke quality.

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

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

<sup>3</sup> Graduando em engenharia, Laboratório de Siderurgia (LaSid) da UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>4</sup> Doutor, Gerdau Ouro Branco, Ouro Branco, MG, Brasil.

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

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo a British Petroleum [1] as reservas provadas de carvão brasileiro foram de 6,6 bilhões de toneladas. No entanto, se inclusas as reservas indicadas e inferidas o Brasil possui reserva de 32,2 bilhões de toneladas de carvão [2]. As reservas economicamente importantes do país localizam-se principalmente na região sul, sendo aproximadamente 89% no estado do Rio Grande do Sul, 10,5% em Santa Catarina e menos de 1% nos estados do Paraná e São Paulo [2].

Os carvões no Rio Grande do Sul são em sua maioria subbetuminos em rank [2,3]. Embora esses carvões não possuam propriedades coqueificantes, seu potencial para aproveitamento para uso na injeção em altos-fornos já foi estudado em escala laboratorial [4]. No entanto, as reservas de carvão localizadas na região nordeste do estado do RS são de carvões betuminosos de alto volátil [2,5], os quais apresentam propriedades coqueificantes [2]. As reservas de carvão dessa jazida representam cerca de 16% do total das reservas brasileiras [6]. Esses carvões, contudo, não são atualmente minerados devido ao seu alto custo de exploração, uma vez que as camadas de carvões estão em profundidade aproximada de 800m.

Os carvões de Santa Catarina (Jazida Sul Catarinense) são em sua maioria de alto volátil e estão majoritariamente distribuídos nas camadas Barro Branco, Bonito e Irapuá [7]. Esses carvões possuem propriedades coqueificantes, especialmente os carvões da camada Barro Branco. No entanto, atualmente os carvões catarinenses são preponderantemente utilizados para a geração de energia elétrica em complexos termoelétricos.

As reservas de carvão na camada Barro Branco correspondem a 3,3% do total das reservas nacionais (cerca de 1 bilhão de toneladas) [6]. Esse carvão foi amplamente utilizado na siderurgia até a década de 90 e chegou a compor cerca de 40% das misturas para a fabricação de coque metalúrgico [8]. Contudo a desregulamentação da obrigatoriedade de uso de carvão nacional e o corte de subsídios impostos pelo governo levaram as siderúrgicas brasileiras a recorrerem totalmente ao carvão mineral importado.

Atualmente o Brasil necessita importar cerca de 14 Mt/ano de carvão para atender o mercado siderúrgico nacional [9], montante muito superior a produção de carvão vendável no país (7,7Mt) [10]. É curioso observar que se o setor siderúrgico buscasse no mercado interno somente uma pequena parte de sua necessidade de carvões, os impactos para a mineração nacional seriam certamente importantes. No entanto, observa-se que nos últimos anos muito pouco foi feito, tanto por siderúrgicas como pelo setor de mineração para se viabilizar o carvão nacional como matéria-prima para a produção de aço.

As maiores dificuldades de aproveitamento dos carvões nacionais pelas siderúrgicas brasileiras residem nos teores de cinzas e enxofre mais elevados do carvão [2,7, 11], que mesmo após beneficiamento são superiores a carvões importados para uso siderúrgico. No entanto, o carvão da camada Barro Branco apresenta propriedades termoplásticas elevadas [8,12]. Essas propriedades podem ser muito interessantes se utilizados em misturas [13], uma vez que possibilitam uma maior introdução de carvões ou materiais carbonosos (coque verde de petróleo [14,15], carvão vegetal [16], etc.) sem propriedades coqueificantes.

Visto o atual cenário, o presente estudo avaliou em escala laboratorial os efeitos da substituição de carvão importado por nacional (Barro Branco) em misturas típicas para fabricação de coque metalúrgico.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Carvões

A Tabela 1 apresenta a nomenclatura, origem, composição química, petrográfica, fluidez, dilatação e composição química das cinzas dos carvões e do coque verde de petróleo (CVP) selecionados para estudo. O carvão nacional (CN) é oriundo da camada Barro Branco (jazida Sul Catarinense) e pode ser classificado como betuminoso de alto volátil de acordo com a norma ASTM D388. Esse carvão foi submetido a beneficiamento intensivo, visto o alto teor de cinzas do carvão direto de mina (run of mine – ROM > 60%). Mesmo assim a amostra de estudo apresenta teor de cinzas de 17%, valor que é superior ao tradicionalmente utilizado em carvões para fabricação de coque (< 10%). Os carvões importados são classificados como betuminosos de alto (A) e médio (B, C e D) volátil. O CVP é considerado um aditivo inerte a coqueificação e possui teor de matéria volátil (11,2%) e cinzas (0,89%) inferior a dos carvões.

### 2.2 Misturas

De modo a avaliar o potencial de utilização do carvão nacional para fabricação de coque metalúrgico, misturas de carvões foram preparadas, conforme mostrado na Tabela 2. A mistura M0-0 representa a mistura base, a qual foi elaborada apenas com carvões importados. Essa mistura possui características semelhantes a misturas de carvões industriais e foi utilizada como referência no estudo. O carvão nacional foi inserido a mistura base como substituto do carvão importado (A) em percentuais de substituição de 50 e 100% (misturas M50 e M100). Essa substituição foi realizada de forma a se manter o teor médio de voláteis da mistura, uma vez que ambos os carvões possuem teor de matéria volátil semelhante (Tabela 1).

Devido ao maior teor de cinzas do carvão nacional em relação ao carvão importado dos EUA, buscou-se investigar também a possibilidade de adição de coque verde de petróleo nas misturas. Essa estratégia foi traçada devido ao baixo conteúdo de cinzas desse material (Tabela 1). Logo, se fez a substituição parcial das misturas por teores de 5, 15 e 30% de CVP. A numeração dada na nomenclatura das misturas de estudo seguiu a seguinte lógica: primeiro valor trata-se do percentual de substituição do carvão (A) por (CN); segundo valor trata-se do percentual de adição de CVP na mistura.

### 2.3 Coqueificação em escala laboratorial

Os ensaios de coqueificação das misturas de carvões (Tabela 2) foram realizados em forno laboratorial (Figura 1), situado no Laboratório de Siderurgia da UFRGS. O ensaio de coqueificação é realizado a partir da introdução de uma carga de 7kg de carvão (base seca) em forno resistivo pré-aquecido a 250°C. A carga de carvões foi aquecida a uma taxa média de 3°C/min até o centro da carga atingir temperatura de 1000°C ( $\pm 10^\circ\text{C}$ ), permanecendo nessa temperatura por 60 minutos. Após o término do ensaio, o coque é resfriado sob um fluxo de nitrogênio até a temperatura ambiente.

**Tabela 1.** Características dos carvões de estudo.

		%CN	A	B	C	D	CVP
Origem		Brasil	EUA	Colômbia	Canadá	EUA	Brasil
MV	% bs (% bsic)	31,5 (38,0)	34,0 (36,4)	26,0 (28,6)	20,7 (23,0)	19,8 (218)	11,2 (11,2)
Cinzas	% bs	17,0	6,5	9,1	10,0	9,0	0,2
C	(% bsic)	87,28	86,53	88,84	89,22	89,68	91,98
H		6,00	5,67	5,43	4,86	4,90	4,16
N		1,95	1,78	2,00	1,43	1,93	2,54
O*		3,09	4,97	2,79	3,96	2,58	0,44
S <sub>T</sub>		87,28	86,53	88,84	89,22	89,68	91,98
R <sub>m</sub>	%	0,84	0,85	1,05	1,22	1,29	-
Vit	% vol. imm	80,0	69,9	84,5	66,7	87,3	-
Lip		4,0	12,4	0,4	0,0	0,0	-
Ine		16,0	17,7	15,1	33,3	12,7	-
TA	°C	345	394	408	447	424	-
TMF		436	438	449	462	468	-
TR		491	476	486	486	501	-
MF	ddpm	>168308	8308	197	2	112	-
MD	%	325	89	19	-	46	-
SiO <sub>2</sub>	%	52,12	50,06	59,6	53,55	47,29	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		26,4	28,77	24,16	28,36	29,05	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		6,15	7,33	4,81	4,10	8,33	-
TiO <sub>2</sub>		4,1	1,93	1,56	1,81	1,73	-
MnO		0,02	0,04	0,02	0,03	0,03	-
MgO		0,82	0,86	0,42	0,45	0,99	-
CaO		0,93	2,30	1,93	3,59	2,84	-
Na <sub>2</sub> O		nd	nd	0,04	nd	nd	-
K <sub>2</sub> O		3,46	2,27	0,95	0,47	2,00	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0,17	0,1	0,98	1,54	0,68	-
SO <sub>3</sub>		1,64	2,99	2,47	2,24	2,78	-

MV=Matéria volátil, S<sub>T</sub>= enxofre total, R<sub>m</sub>=refletância randômica média, Vit= vitrinita, Lip= Liptinita, Ine= inertinita, TA= temperatura de amolecimento, TM= temperatura de máxima fluidez, TR= temperatura de ressolidificação, MF= máxima fluidez, MC= máxima contração, MD= máxima dilatação, bsic= base seca isenta de cinzas, bs= base seca, imm= isenta de matéria mineral, ddpm= dial division per minute,

**Tabela 2.** Composição das misturas de carvão.

(% em massa)	M0- 0	M50 -0	M100- 0	M0- 5	M50- 5	M100- 5	M0- 15	M50- 15	M100- 15	M0- 30	M50- 30	M100- 30
CN	0	10	20	0	9,5	19	0	8,5	17	0	7	14
A	20	10	0	19	9,5	0	17	8,5	0	14	7	0
B	40	40	40	38	38	38	34	34	34	28	28	28
C	20	20	20	19	19	19	17	17	17	14	14	14
D	20	20	20	19	19	19	17	17	17	14	14	14
CVP	0	0	0	5	5	5	15	15	15	30	30	30



Figura 1. Forno de coqueificação em escala de laboratório.

## 2.4 Caracterização do coque

A caracterização do coque produzido foi realizada a partir das análises imediata (ASTM 3176), enxofre total (ASTM D 4239), tamanho médio, resistência mecânica ao tamboramento (antes e após reação com  $\text{CO}_2$ ) e reatividade. A seguir é apresentado um breve descritivo de alguns dos ensaios.

### 2.4.1 Tamanho médio e formação de finos

Após os ensaios de coqueificação as amostras de coque foram estabilizadas a partir de uma série de três quedas de uma altura de 1,8 m de altura. O tamanho médio do coque (TM) foi determinado a partir do peneiramento do coque (Equação 1).

$$TM = (B(a-c)+C(b-d)+\dots+J(h-k) +100j)/200 \quad (1)$$

onde, a, b, c,,j são as aberturas das sucessivas das peneiras e A, B, C...J são os valores percentuais acumulados da massa retida nas peneiras.

Após a estabilização do coque, o percentual mássico de coque com granulometria inferior a 9,5 mm foi considerado e utilizado como índice de formação de finos.

### 2.4.2 Ensaio de resistência mecânica em tambor tipo “I”

Para realização do teste utilizou-se um tambor tipo “I” com as mesmas características do tambor utilizado para a realização do teste padrão de CSR – *Coke Strength after Reaction* (ASTM 5341). Utilizou-se uma amostra de 200 g de coque com granulometria entre 19 e 22,4 mm, a qual foi submetida a 600 revoluções. Após passar pelo teste no tambor, o coque foi peneirado em malha de seção quadrada, com dimensão de 9,5 mm. O índice, denominado nesse trabalho como I600, foi determinado a partir da relação entre a massa retida na peneira de 9,5 mm e a massa inicial antes do teste de tambor vezes cem.

### 2.4.3 Reatividade ao CO<sub>2</sub> (CRI)

O ensaio é realizado de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma ASTM 5341. De forma sucinta, uma amostra de 200 g de coque, com granulometria entre 19 e 22,4 mm, é submetida durante 2 horas a um fluxo de 5 L/min de CO<sub>2</sub> em temperatura de 1100°C. O material é então resfriado sob fluxo de nitrogênio, obtendo-se ao final a perda de massa da amostra devido à reação de Boudouard. O índice de reatividade (CRI) é determinado pela relação entre a perda de massa da amostra e sua massa inicial vezes cem.

### 2.4.4 Ensaio de resistência mecânica após a reação (CSR)

O ensaio é realizado de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma ASTM 5341. Para determinar o CSR do coque, a mesma amostra utilizada no teste de reatividade é submetida a 600 revoluções em um tambor tipo “I”, durante 30 minutos. Após o teste o coque é peneirado em malha de seção quadrada com dimensão de 9,5 mm. O índice de resistência após reação (CSR) é obtido através da relação entre a massa retida na peneira e a massa inicial antes do teste vezes cem.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Propriedades do carvão nacional

Conforme apresentado na Tabela 1, o carvão nacional apresenta teor de cinzas de 17%, valor muito inferior ao tipicamente encontrado em carvões ROM provenientes da camada Barro Branco [7], os quais chegam a mais de 60%. Esse baixo teor de cinzas é resultado do intensivo beneficiamento gravimétrico a que esse carvão foi submetido, realizado por jiques e espirais. No entanto, o rendimento do carvão beneficiado a 17% de cinzas foi inferior a 5% para a amostra de estudo, evidenciando a dificuldade de se gerar um carvão com baixo teor de cinzas a partir do carvão ROM da camada Barro Branco. Mesmo com beneficiamento intensivo, o teor de cinzas do carvão nacional foi aproximadamente 2 vezes maior que os demais carvões importados. A matéria mineral presente em carvões tem comportamento inerte durante a coqueificação, diminuindo a aglutinação das misturas e conseqüentemente a qualidade do coque. No entanto, o fator mais nocivo de se produzir coque com carvões de mais alto teor de cinzas se dá dentro dos altos-fornos, uma vez que as cinzas serão transformadas em escória à custa de aumento de energia e conseqüente redução de produtividade.

Outro fator negativo em relação ao uso do carvão nacional para a produção de coque está no seu alto teor de enxofre (1,68%), o qual é superior aos demais carvões importados (Tabela 1). Durante a etapa de coqueificação apenas uma pequena parcela do enxofre é liberado na forma gasosa. Assim, a indústria siderúrgica procura limitar o teor de enxofre dos carvões na produção de coque em até 1%, uma vez que esse elemento é parcialmente incorporado ao ferro gusa, diminuindo a qualidade do produto.

O carvão nacional apresentou alto teor de macerais do grupo da vitrinita (80%). Nota-se que sua composição maceral é similar aos carvões americanos (A e D), os quais são considerados ideais a coqueificação devido a elevada quantidade de macerais reativos (vitrinita e liptinita). Esses macerais são os responsáveis majoritários pelo comportamento de amolecimento e inchamento do carvão.

Portanto, a composição maceral do carvão nacional de estudo pode ser considerada favorável à produção de coque.

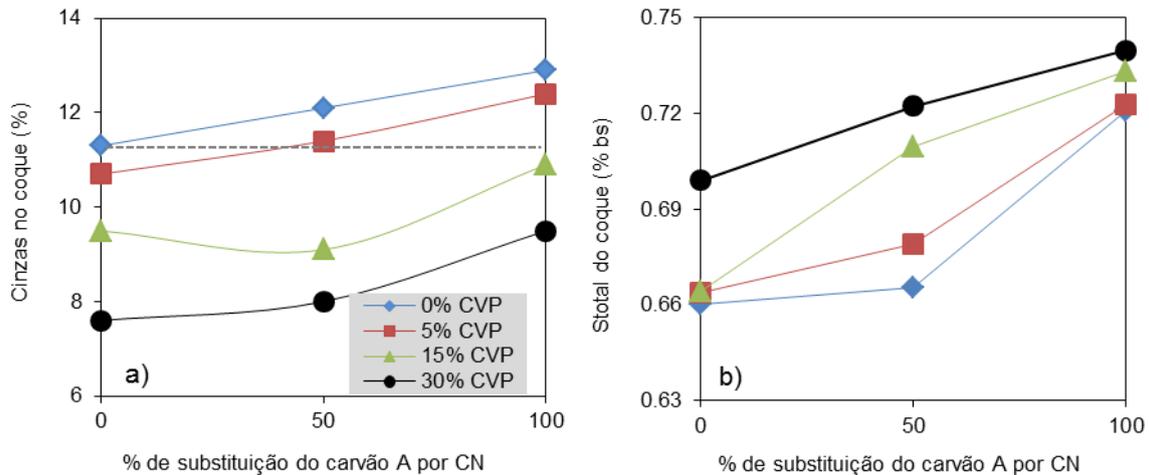
O carvão nacional apresenta propriedades termoplásticas muito superiores aos demais carvões (Tabela 1). Observa-se que a máxima fluidez do carvão CN foi superior a 168000 ddpm, valor próximo ao limite de detecção do instrumento utilizado na medição. Além disso, o teste de fluidez revelou que o carvão nacional apresentou amolecimento em temperatura (345°C) muito inferior aos demais carvões e uma elevada temperatura de resolidificação (496°C) para carvões de mesmo rank. O carvão nacional apresentou dilatação de 325%, valor muito superior aos demais carvões. Os resultados obtidos através dos testes de plastometria e dilatométrica revelam que o carvão nacional apresenta propriedades termoplásticas extremamente desenvolvidas. Poucos carvões em escala global apresentam comportamento semelhante e maiores estudos são necessários para compreender o que leva esse carvão a apresentar tais propriedades. É importante salientar que do ponto de vista da coqueificação, as propriedades termoplásticas são fundamentais para a geração de um coque de qualidade. Os fenômenos de amolecimento, desvolatilização e inchamento são responsáveis pela aglutinação entre partículas e formação de uma massa porosa e resistente. Carvões de alta fluidez e dilatação são importantes em misturas, pois ajudam a aumentar a aglutinação, principalmente em misturas contendo elevado teor de inertes. No entanto, a formação de uma massa plástica de baixa viscosidade associada à taxas elevadas de desvolatilização podem resultar em porosidade excessiva, diminuindo a qualidade do coque.

### 3.2 Influência do carvão nacional na qualidade do coque

#### 3.2.1 Composição química e rendimento do coque

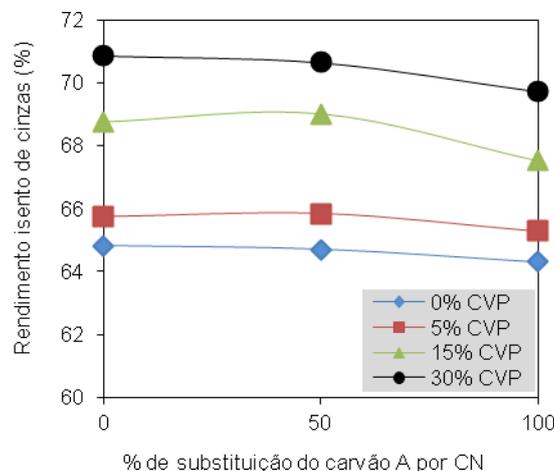
Conforme esperado, a Figura 2a mostra que substituição do carvão importado A pelo carvão nacional CN resulta na produção de coques com teor de cinzas mais elevado. No entanto, a adição de coque de petróleo reduz o teor de cinzas do coque de forma substancial. Assim, se adotarmos como referência o teor de cinzas (11,3%) do coque produzido a partir da mistura base (linha pontilhada), observamos que a adição de 15% ou mais de CVP viabiliza a substituição parcial ou total do carvão importado mantendo os teores de cinzas abaixo do coque referência.

A Figura 2b apresenta os resultados de enxofre total dos coques. Nota-se que tanto a substituição de carvão importado por nacional, como a adição de coque de petróleo elevam o teor de enxofre no coque. Carvões brasileiros possuem em geral alto teor de enxofre, o qual é majoritariamente de origem pirítica [18]. Logo, devido às dificuldades de se beneficiar o carvão Barro Branco a teores de cinzas inferiores ao obtido nesse estudo, a substituição de carvões importados (que geralmente apresentam enxofre inferior a 1%) por carvão nacional irá incidir em aumento de enxofre no coque. Durante a coqueificação, carvões liberam parte do enxofre de sua estrutura na forma de voláteis. Em geral, carvões de menor rank apresentam maior perda de enxofre durante a coqueificação. Coque de petróleo, no entanto, apresenta baixa taxa de dessulfuração durante coqueificação [19], o que justifica o aumento do enxofre no coque observado.



**Figura 2.** Influência da substituição de carvão importado por nacional no teor de (a) cinzas e (b) enxofre do coque.

A Figura 3 apresenta rendimento de coque em função do percentual de substituição de carvão importado por nacional para as misturas contendo diferentes teores de CVP. O rendimento do coque é definido como razão entre massa de coque produzido e a massa de carvão carregado no forno antes da coqueificação. No entanto, como os coques apresentam teores de cinzas variados (Figura 2), o valor de rendimento dos coques apresentado na Figura 3 foi calculado em base isenta de cinzas. A substituição do carvão A por CN apresenta uma ligeira diminuição do rendimento do coque. Em contrapartida, a adição de coque de petróleo aumenta de forma importante o rendimento.



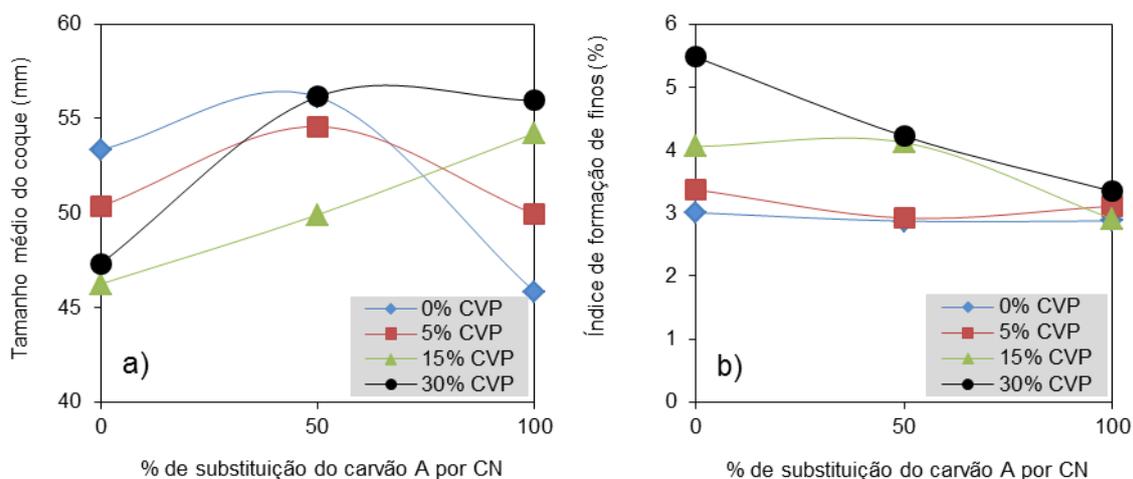
**Figura 3.** Influência da substituição de carvão importado por nacional no rendimento do coque.

### 3.2.2 Resistência mecânica a frio

A Figura 4a mostra o tamanho médio dos coques. Em coques contendo até 5% de coque de petróleo a substituição do carvão A pelo carvão CN aumenta o tamanho médio dos coques para substituição de 50%. No entanto, ao se substituir completamente o carvão A, ocorre uma diminuição importante do tamanho médio do coque. Já para coques com nível mais elevado de inertes (15 e 30% de CVP), a substituição parcial ou total do carvão importado produz coques com tamanho médio superior. Alterações positivas no tamanho médio do coque são indicativos de um

menor nível de trincas, suscetibilidade a fraturas e formação de finos. Logo, os resultados da Figura 4a indicam que a substituição do carvão A por CN pode gerar coques mais adequados para uso em altos-fornos, especialmente em condições de alta concentração de inertes.

A Figura 4b apresenta o índice de formação de finos em função do percentual de substituição do carvão importado A pelo carvão nacional CN para as misturas contendo diferentes teores de coque de petróleo. Observa-se claramente que a formação de finos está intimamente correlacionada a presença de inertes na mistura, onde quanto maior o teor de CVP, maior a formação de finos. Essa maior formação de finos indica uma piora da capacidade aglutinante das misturas. A substituição de carvão importado por carvão nacional não altera de forma importante a formação de finos para misturas com baixo teor de coque de petróleo (Figura 4b). No entanto, para as misturas com adição de 15 e 30% de CVP, a substituição parcial ou total do carvão importado reduz de forma substancial a formação de finos do coque. Esse resultado está possivelmente associado ao aumento das propriedades termoplásticas para misturas contendo maiores percentuais de carvão nacional. A formação de finos é indesejada na produção de coque, uma vez que o material fino (fração < 10 mm) é facilmente perdido no transporte do coque até os altos-fornos, impactando no seu rendimento e no meio ambiente. Além disso, finos são indesejados no interior dos altos-fornos e são rejeitados como matéria-prima do forno.

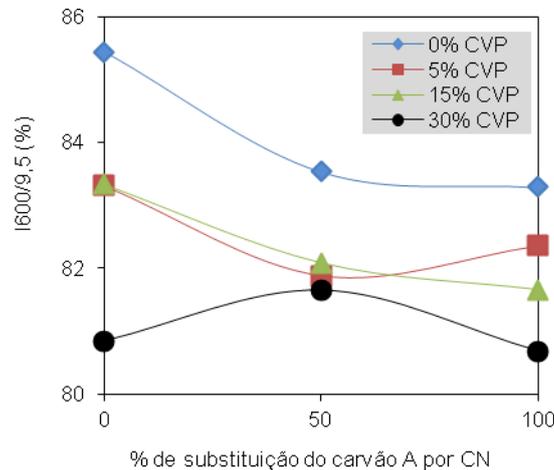


**Figura 4.** Influência da substituição de carvão importado por nacional no (a) tamanho médio e na (b) formação de finos no coque.

A Figura 5 apresenta o resultado do ensaio de tamboramento para os coques de estudo. De modo geral, a substituição do carvão importado leva a uma redução da resistência mecânica do coque. Essa redução da resistência diminui ao passo que o teor de coque de petróleo aumenta de 0 a 15%. Para a amostra contendo 30% de CVP é possível observar um ligeiro aumento da resistência com a substituição parcial do carvão A por CN.

Os resultados de resistência mecânica do coque apresentados nas Figuras 4 e 5 indicam que a substituição parcial ou total do carvão importado A pelo carvão nacional da camada Barro Branco pode resultar em manutenção ou aumento de qualidade em coques com alto teor de coque de petróleo. Acredita-se que esses resultados são provenientes da melhora de aglutinação que o carvão nacional pode

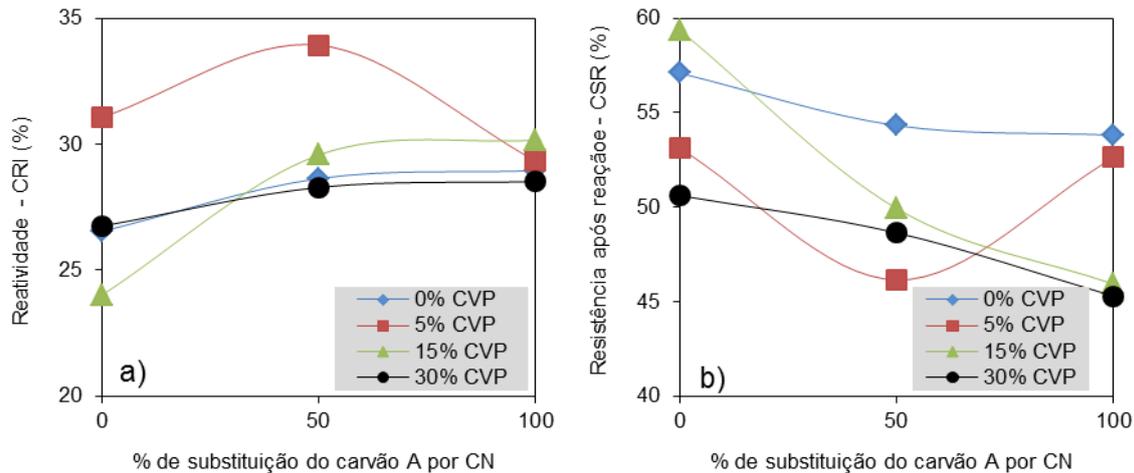
oferecer em misturas com alto teor de inertes. Em misturas com baixo teor de inertes, a substituição do carvão importado resultou em uma piora da resistência mecânica do coque. As causas dessa piora não puderam ser esclarecidas nesse estudo. No entanto, acredita-se que devido sua elevada termoplasticidade, o carvão nacional possa gerar uma estrutura excessivamente porosa, diminuindo a resistência do coque. Estudos de caracterização da microestrutura porosa desses coques serão realizados para confirmar essa hipótese.



**Figura 5.** Influência da substituição de carvão importado por nacional na resistência ao tamboramento do coque.

### 3.2.3 Reatividade e resistência mecânica após reação

A Figura 6a mostra o resultado do teste de reatividade ao  $\text{CO}_2$  para os diferentes coques de estudo. Observa-se que a substituição parcial ou total do carvão A por CN resulta em um ligeiro aumento de reatividade para os coques, com exceção da amostra M100-5. Os testes de reatividade não são conclusivos com respeito à influência da adição CVP, uma vez que não se identificou uma tendência clara da reatividade com a variação dos teores do material. O teste de reatividade (CRI) é um dos mais importantes parâmetros de controle da qualidade do coque. No interior dos altos-fornos o coque está submetido à reação com  $\text{CO}_2$ . Essa reação é desejada, uma vez que produz gás redutor ( $\text{CO}$ ) para a redução do minério de ferro. No entanto, coques que apresentam elevada reatividade estão sujeitos a uma maior degradação granulométrica, devido à fragilização de sua estrutura carbonosa. A Figura 6b mostra o teste de resistência mecânica realizado após o coque ser submetido ao teste de reatividade. A substituição do carvão A por CN apresenta a tendência de reduzir a resistência do coque. Assim, o aumento de reatividade com a substituição do carvão importado pelo carvão nacional indica uma piora da qualidade do coque, a qual resulta em uma menor resistência mecânica após reação. Esse tipo de relação entre reatividade (CRI) e resistência após reação (CSR) foi observado por diversos autores [17,20]. Estudos futuros serão realizados para se avaliar os mecanismos que causam a elevação da reatividade do coque.



**Figura 6.** Influência da substituição de carvão importado por nacional na a) reatividade (CRI) e b) resistência mecânica após reação (CSR) do coque.

#### 4 CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou avaliar a influência da substituição de um carvão alto volátil americano pelo carvão nacional da camada Barro Branco em escala laboratorial. Isso foi realizado em misturas com variadas adições de coque de petróleo. Os resultados do estudo apontam que a substituição parcial de carvão importado por nacional é viável tecnicamente sem que ocorram prejuízos importantes à qualidade do coque gerado em condições específicas. Para as misturas contendo baixo teor de adição de CVP, a substituição do carvão importado levou a uma ligeira piora da qualidade do coque, caracterizada tanto por uma menor resistência mecânica e uma maior reatividade. No entanto, as diferenças de qualidade dos coques produzidos com ou sem carvão nacional foram menores para misturas com alto teor de CVP, onde as características termoplásticas da mistura passam a controlar a qualidade do coque gerado.

#### Agradecimentos

Os autores desse trabalho agradecem a Gerdau Usina Ouro Branco pelo fornecimento dos carvões importados e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo financeiro.

#### 6 REFERÊNCIAS

1. British petroleum. Statistical Review of World Energy. <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf>. Data de acesso: 01/03/2017
2. Kalkreuth W, Holz M, Lern M, Machado G, Mexias A, Silva MB, *et al.* Petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 1. Santa Terezinha, Leão-Butiá and Candiota Coalfields, Rio Grande do Sul, Brazil. *International Journal of Coal Geology*. 2006.
3. Silva MB, Kalkreuth W, Holz M. Coal petrology of coal seams from the Leão-Butiá Coalfield, Lower Permian of the Paraná Basin, Brazil – Implications for coal facies interpretations. *International Journal of Coal Geology*. 2008.

4. Osório E; Gomes MLI, Vilela ACF, Kalkreuth W, 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* 2006; 68:14–29.
5. Osório E. Utilização de carvões da jazida Chico-Lomã para a produção de coque [tese de doutorado]. Porto Alegre: UFRGS;1997.
6. DNPM Balanço Mineral Brasileiro; 2001[acesso em 01 maio.2017].Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001>. Data de acesso: 01/05/2017
7. Kalkreuth W, Holz M, Mexias A, Balbinot M., Levandowski J, Willet J, Finkelman R, Burger H. Depositional setting, petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 2. South Santa Catarina Coalfield. Brazil. *Internacional Journal of Coal*. 2010.
8. Jardim JC, Energy strategies for ironmaking and mining. Future vision. The use of mineral national coal in Brazilian steel industry: past and future. *Energy Strategies for Ironmaking and Mining. Future Vision*. 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas. Belo Horizonte:ABM; 2013.
9. IABr. Instituto Aço Brasil. Anuário estatístico 2016.
10. ABCM Associação Brasileira de Carvão Mineral 2015.
11. Oliveira MLS, Ward CR, Sampaio CH, Querol X, Cutruneo, SRT., Silva LFO. Partitioning of mineralogical and inorganic geochemical components of coals from Santa Catarina, Brazil, by industrial beneficiation processes. *International Journal of Coal Geology*, 2013.
12. Borba PEM, Uihôa MB, Souza LOB. Utilização de carvão de Santa Catarina na fabricação de coque. II Congresso Brasileiro de Carvão. Porto Alegre; 1989.
13. Miyazu T, Okuyama Y, Fukuyama T, Suzuki N. The evaluations and design of blends using many kinds of coal for coke making. *International Iron and Steel Congress*. Dusseldorf, 1974.
14. Alvarez R, Pis JJ, Diez MA, Barriocanal C, Canga CS, Menéndez JA. A semi-industrial scale study of petroleum coke as an additive in cokemaking. *Fuel processing technology*, 1997:129-141.
15. Maranhã SPD. Efeito da utilização de material inerte nas misturas de carvão a coqueificar. 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas. São Paulo:ABM; 2011.
16. Flores BD, Flores IV, Guerrero A, Orellana DR, Pohlmann JG, Diez MA, Borrego AG, Osório E, Vilela ACF. Effect of charcoal blending with a vitrinite rich coking coal on coke reactivity. *Fuel Processing Technology*, 2017;155:97-105.
17. Menéndez JA, Alvarez R, Pis JJ. Determination of metallurgical coke reactivity at INCAR: NSC and ECE-INCAR reactivity tests. *Ironmaking Steelmaking*.
18. Fallavena VLV, Inácio TD, Abreu CS, Azevedo CMN, Pires M. Acidic Peroxidation of Brazilian Coal: Desulfurization and Estimation of the Forms of Sulfur. *Acidic Peroxidation of Brazilian Coal: Desulfurization and Estimation of the Forms of Sulfur Energy Fuels* 2012, 26, 1135–1143
19. Guilherme LRS, CAM, Iara Patrícia VO, Alfredo Carlos BQ, Paulo Henrique GD, Erick MHB, *et al.* Use of Free Swelling Index for Determining Rate of Desulphurization of Coking Process. *AISTech 2016 Proceedings*
20. Wang Q, Guo R, Zhao X, Sun Z, Zhang S, Liu W. A new testing and evaluating method of cokes with greatly varied CRI and CSR. *Fuel* 2016;182: 879-885. 1999; 26:117–21.