

AVALIAÇÃO LABORATORIAL DO USO DE CARVÃO NACIONAL NA FABRICAÇÃO DE COQUE METALÚRGICO

Bruno D. Flores^{1*}, Anderson A. Agra², Matheus F. Rückert³, Luiz G. Schander⁴, Matheus T. Fraga⁵,
Guilherme L. R. da Silva⁶, Antônio C.F. Vilela⁷, Eduardo Osório⁸

^{1-5,7,8} Laboratório de Siderurgia (LaSid) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ⁶ Gerdau Usina Ouro Branco

¹bruno.flores@ufrgs.br, ²anderson.agra@ufrgs.br, ³matheus.ruckert@ufrgs.br, ⁴matheus.fraga@ufrgs.br,

⁵luizguilherme.schander@gmail.com, ⁶guilherme.silva@gerdau.com.br, ⁷vilela@ufrgs.br, ⁸eosorio@ufrgs.br

RESUMO

O carvão brasileiro, especialmente aquele oriundo da camada Barro Branco (Jazida sul catarinense), foi amplamente explorado para uso siderúrgico até meados da década de 90. No entanto, uma série de fatores técnicos e econômicos levou a indústria nacional a cessar o uso desse carvão, levando o país a depender totalmente de carvões importados. Visto o atual cenário, o presente estudo visa avaliar em escala laboratorial os efeitos da substituição de carvão importado por nacional em misturas típicas para fabricação de coque metalúrgico. Para isso, carvão da camada Barro Branco foi amostrado, beneficiado e caracterizado. Misturas entre carvões coqueificáveis importados, coque de petróleo (CVP) e o carvão nacional foram produzidas de modo a permitir a avaliação termoplástica dessas misturas (testes de plastometria Gieseler e dilatometria Audibert-Arnu), bem com avaliar a influência do carvão nacional na qualidade do coque. O coque gerado no estudo foi produzido em escala de laboratório (enformamento de 7kg) e posteriormente avaliado a partir de testes de resistência mecânica (teste de queda e tamboramento – antes e após reação com CO₂) 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 CVP, 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.

ABSTRACT

Brazilian coal from Barro Branco seam (Sul Catarinense coalfield) was extensively exploited for steelmaking application until the 90s. However, a number of technical and economic factors led the Brazilian industry to cease the use of this coal, leading the country to rely entirely on imported coking coals. Considering the current scenario, the present study aims at evaluating on a laboratory scale the effects of substitution imported coals by Brazilian coal for coke production. Thus, coal from Barro Branco seam was sample, benefited and characterized. Blends of imported coking coals, petroleum coke (PET) and Brazilian coal were produced in order to allow the thermoplastic evaluation of the blends (Gieseler plastometry and Audibert-Arnu dilatometry tests), as well as to evaluate the influence of Brazilian coal on the quality of coke. The coke was produced in a laboratory scale (7 kg settling) and later evaluated from strength tests (shatter and drum test - before and after reaction with CO₂) 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 to coke quality. The differences in the quality of the cokes produced with or without domestic coal were lower for blends with high PET content, where the thermoplastic characteristics of the coal blends become a controlling factor of coke quality.

Key-Words: coke, cokemaking, Brazilian coal, Barro Branco coal, thermoplastic properties, coke quality.

1 INTRODUÇÃO

A busca por uma diversificação na matriz de carvões utilizados para a fabricação de coque é uma tendência mundial e uma ferramenta indispensável para a competitividade do setor siderúrgico. Nos

últimos anos os preços dos carvões considerados ideais para a produção de coque tem se mantido em patamares elevados (BRITISH PETROLEUM, 2016), impactando diretamente no custo final do aço.

Segundo a *British Petroleum* (2016) as reservas provadas de carvão brasileiro foram de 6,6 bilhões de toneladas. No entanto, se incluídas as reservas indicadas e inferidas o Brasil possui uma 32,2 bilhões de toneladas de carvão (KAULKREUTH et al., 2006). 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 (KAULKREUTH et al., 2006).

Os carvões no Rio Grande do Sul são em sua maioria subbetuminosos em rank (SILVA et al., 2008; KAULKREUTH et al., 2006). Embora esses carvões não possuam propriedades coqueificantes, seu potencial para aproveitamento para uso na injeção em altos-fornos já foi estudado em escala laboratorial (OSÓRIO et al., 2006). No entanto, as reservas de carvão localizadas na região nordeste do estado são de carvões betuminosos de alto volátil (KAULKREUTH et al., 2006; OSÓRIO, 1997), os quais apresentam propriedades coqueificantes (KAULKREUTH et al., 2006). As reservas de carvão dessa jazida representam cerca de 16% do total das reservas brasileiras (DNPM, 2001). Esses carvões, contudo, não são atualmente minerados devido ao seu alto custo de exploração, uma vez que as camadas de carvões estão em profundidade de 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 (KAULKREUTH et al., 2010). 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 termoeletrônicos.

As reservas de carvão na camada Barro Branco correspondem a 3,3% do total das reservas nacionais (cerca de 1 bilhão de toneladas) (DNPM, 2001). 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. 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.

As maiores dificuldades de aproveitamento dos carvões nacionais pelas siderúrgicas brasileiras residem nos teores de cinzas e enxofre mais elevados do carvão (KAULKREUTH et al., 2006; KAULKREUTH et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2013), que mesmo após beneficiamento são superiores a carvões importados para uso siderúrgico. No entanto, o carvão da camada Barro Branco apresenta propriedades termoplásticas elevadas (JARDIM, 2013). Essas propriedades podem ser muito interessantes se utilizados em misturas (MIYAZU et al., 1974), uma vez que possibilitam uma maior introdução de carvões ou materiais carbonosos (coque verde de petróleo (ALVARES et al., 1997; MARANHA, 2011)), carvão vegetal (FLORES et al., 2017) sem propriedades coqueificantes.

Atualmente o Brasil necessita importar cerca de 15 Mt/ano de carvão para atender o mercado siderúrgico nacional (IABr, 2016), montante muito superior a produção de carvão vendável no país (7,7Mt) (ABCM, 2016). 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.

Visto o atual cenário, o presente estudo visou avaliar 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 e petrográfica 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 de acordo com a norma ASTM D388 como betuminoso de alto volátil. 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.

A composição química das misturas apresentadas na Tabela 2 foi estimada por aditividade considerando os percentuais mássicos de cada carvão nas misturas e suas propriedades individuais. As propriedades termoplásticas das misturas foram avaliadas por testes de testes de plastometria Gieseler e dilatometria Audibert-Arnu, conforme as normas ASTM D2639 e D5515, respectivamente.

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.

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 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).

Tabela 1. Características dos carvões de estudo.

Carvões	Origem	MV % bs (% bsic)	Cinzas % bs	S % bsic	Rm %	Vit	Lip %vol. imm	Ine	TA	TMF °C	TR	MF ddpm	MC %	MD
%CN	Brasil	31,5 (38,0)	17,0	1,68	0,84	80,0	4,0	16,0	345	436	491	>168308	11	325
A	EUA	34,0 (36,4)	6,5	1,05	0,85	69,9	12,4	17,7	394	438	476	8308	23	89
B	Colômbia	26,0 (28,6)	9,1	0,94	1,05	84,5	0,4	15,1	408	449	486	197	21	19
C	Canadá	20,7 (23,0)	10,0	0,53	1,22	66,7	0,0	33,3	447	462	486	2	11	-
D	EUA	19,8 (218)	9,0	0,92	1,29	87,3	0,0	12,7	424	468	501	112	17	46
CVP	Brasil	11,2 (11,2)	0,2	0,87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

MV=Matéria volátil, S= enxofre total, Rm=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

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

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 (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 CO₂ (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 CO₂ em temperatura de 1100°C. O material é então resfriada

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 (KALKREUTH et al., 2010), 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 jigues 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 consequentemente 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 consequente redução de produtividade.

Outro fator negativo em relação ao uso do carvão nacional para a produção de coque está no alto teor de enxofre (1,68%) encontrado na amostra, 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. Em carvões coqueificáveis, macerais do grupo da vitrinita e liptinita são os responsáveis majoritários pelo comportamento de amolecimento e inchamento do carvão. Portanto, a composição maceral do carvão nacional 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 dilatometria 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 fenômeno. 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. 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 CARVÃO NACIONAL COMO COMPONENTE DE MISTURAS PARA A PRODUÇÃO DE COQUE

De modo a verificar a influência da substituição de carvão importado por nacional, a composição química das misturas apresentadas na Tabela 2 foi estimada por aditividade e suas propriedades de fluidez e dilatação medidas. A Tabela 3 apresenta os resultados da estimativa das quantidades de matéria volátil (MV), cinzas (Cz) e enxofre (S), bem como a medida da máxima fluidez e máxima dilatação das misturas. Observa-se que a mistura base M0-0 apresenta características químicas e termoplásticas típicas ao que é visado em na produção de coque em ambientes industriais.

A substituição do carvão importado A pelo carvão nacional não altera de forma importante o teor de matéria volátil das misturas (Tabela 3), uma vez que os carvões são de rank similar. No entanto, é notável que a adição de coque de petróleo impacta fortemente no teor de matéria volátil das misturas. Para teores de 30% de adição de CVP o percentual de MV da mistura é reduzido em cerca de 20%.

Observa-se que é estimado que o aumento da participação de carvão nacional eleve o teor de cinzas das misturas (Tabela 3). Esse é um dos principais inconvenientes da substituição de carvões importados, que possuem teores de cinzas inferiores aos nacionais. O aumento de cinzas nas misturas eleva a carga de material inerte durante a coqueificação, piorando as condições de aglutinação das misturas durante a carbonização. Além disso, a elevação do teor de cinzas em misturas, e no coque,

Tabela 3 – Propriedades das misturas de carvão.

Propriedades	M0-0	M50-0	M100-0	M0-5	M50-5	M100-5	M0-15	M50-15	M100-15	M0-30	M50-30	M100-30
MV (bs %)	25,3	25,1	24,8	24,6	24,4	24,1	23,2	23,0	22,8	21,1	20,9	20,7
Cz (bs %)	8,7	9,8	10,8	8,3	9,3	10,3	7,5	8,4	9,2	6,2	6,9	7,6
S (bsic)	0,88	0,94	1,00	0,88	0,94	1,00	0,88	0,93	0,98	0,87	0,92	0,96
MF (ddpm)	228	547	1326	164	359	1023	120	236	590	45	88	319
MD (%)	17	30	49	13	17	36	-8,6	-7,95	0,2	ND	ND	ND

eleva o consumo de combustíveis nos altos-fornos e diminui sua produtividade. Em contrapartida ao aumento do teor de cinzas pela introdução de carvão nacional, nota-se que a adição de CVP reduz o percentual de cinzas das misturas. Assim, parece indispensável que a introdução de carvão nacional em misturas para coqueificação seja acompanhada da adição de materiais carbonosos com baixo teor de cinzas, tais como CVP.

O aumento da participação de carvão nacional leva a uma elevação do teor de enxofre nas misturas. Esse aumento é de cerca de 10% no momento em que o carvão importado A é completamente substituído por CN. Já a introdução de coque de petróleo mostra uma ligeira tendência de diminuição do teor de enxofre. O enxofre é prejudicial à qualidade do ferro gusa produzido nos altos-fornos e deve ser mantido o mais baixo possível em misturas para produção de coque.

As propriedades termoplásticas das misturas são fortemente elevadas com a substituição do carvão A pelo carvão nacional CN (tabela 3). Observa-se que a completa substituição do carvão importado, indiferente do teor de coque de petróleo, eleva a máxima fluidez das misturas em cerca de 5 vezes. Esse resultado é especialmente importante para misturas contendo alto teor de inertes, uma vez que o aumento de fluidez indica uma melhor capacidade de aglomeração das partículas. MIYAZU et al. (1974) definiram que a máxima resistência de coques é obtida com misturas que apresentam fluidez máxima no intervalo de 200 a 1000 ddpm. Assim, nota-se que as misturas contendo coque de petróleo só se inserem no intervalo ótimo de fluidez a partir da introdução de carvão nacional. A dilatação máxima das misturas também é fortemente elevada pela presença de carvão nacional. No entanto, a adição de coque de petróleo reduz fortemente a dilatação, ao passo que em misturas com 30% de do material não foi possível observar dilatação. A dilatação de misturas para a fabricação de coque deve ser tal que permita uma alta capacidade de aglomeração, mas sem a

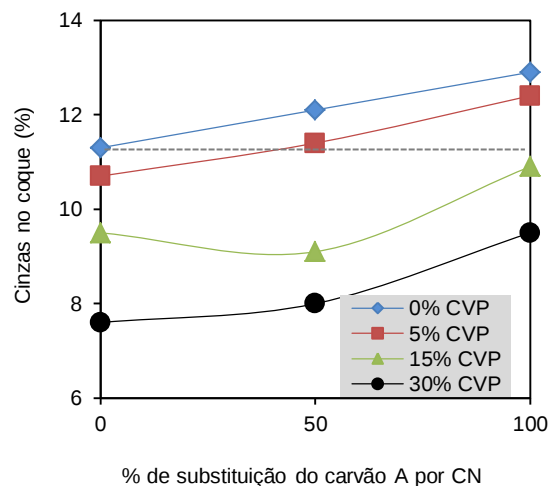
formação de grandes vazios devido a formação de poros excessivos.

3.3 INFLUÊNCIA DO CARVÃO NACIONAL NA QUALIDADE DO COQUE

3.3.1 Teor de cinzas e rendimento do coque

Conforme esperado, a Figura 2 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 cinza abaixo do coque referência.

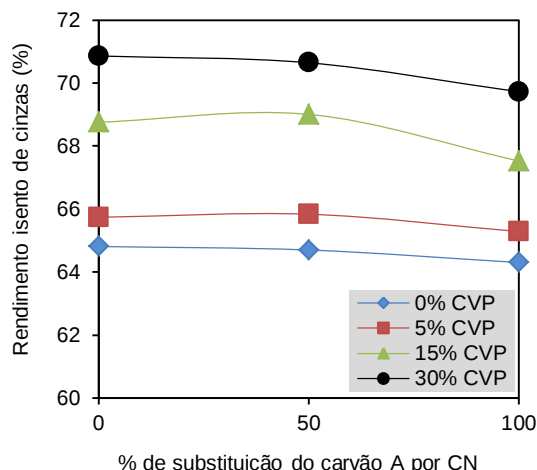
Figura 2. Influência da substituição de carvão importado por nacional no teor de cinzas do coque.



A Figura 3 apresenta rendimento de coque em função do percentual de substituição de carvão importado por nacional para as misturas contendo diferente 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

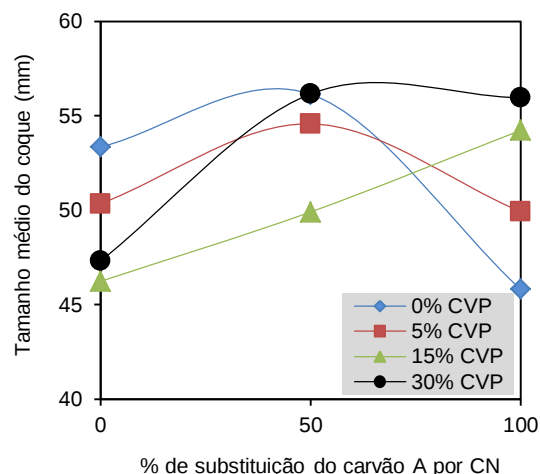
(Figura 2), o valor de rendimento dos coques apresentado na Figura 3 foi calculado em base isenta de cinzas. A substituição do carvão A por CN apresenta uma ligeira diminuição do rendimento do coque. Em contrapartida, a adição de coque de petróleo aumenta de forma importante o rendimento.

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



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.

Figura 4. Tamanho médio do coque produzido com carvão nacional.



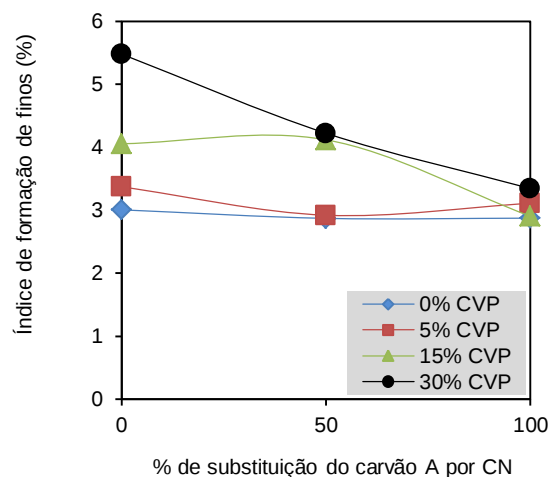
3.3.2 Resistência mecânica a frio

A Figura 4 mostra o tamanho médio dos coques após estabilização em função do percentual de substituição do carvão importado A pelo carvão nacional CN para as misturas contendo diferentes teores de coque de petróleo. 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 indicativas de um menor nível de trincas, suscetibilidade a fraturas e formação de finos. Logo, os resultados da Figura 4 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 5 apresenta o índice de formação de finos em função do percentual de substituição do carvão importado A pelo carvão nacional CN para as

Figura 5. Influência da substituição de carvão importado por nacional na formação de finos no coque.

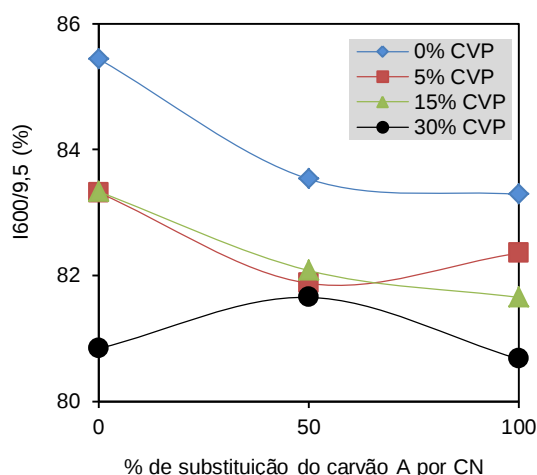


A substituição de carvão importado por carvão nacional não altera de forma importante a formação de finos para misturas com baixo teor de coque de petróleo (Figura 5). No entanto, para as misturas com adição de 15 e 30% de CVP, a substituição parcial ou total do carvão importado reduz de forma substancial a formação de finos do coque. Esse resultado está possivelmente associado ao aumento das propriedades termoplásticas (Tabela 2) para misturas contendo maiores percentuais de carvão

nacional. A formação de finos é indesejada na produção de coque, uma vez que o material fino é facilmente perdido no transporte do coque até os altos-fornos. Além disso, finos são indesejados no interior dos altos-fornos e são rejeitados como matéria-prima do forno.

A Figura 6 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.

Figura 6. Influência da substituição de carvão importado por nacional na resistência ao tamboramento do coque.



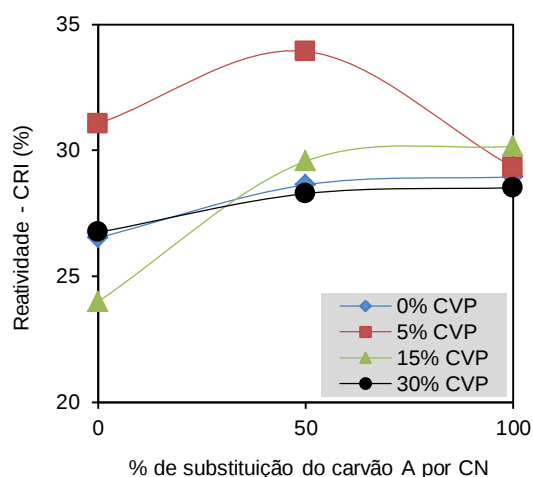
Os resultados de resistência mecânica do coque apresentados nas Figuras 4 a 6 indicam que a substituição parcial ou total do carvão importado A pelo carvão nacional da camada Barro Branco pode resultar em manutenção ou aumento de qualidade em coques com alto teor de coque de petróleo. Acreditasse que 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, acreditasse que devido sua elava 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.

3.3.3 Reatividade e resistência mecânica após reação

A Figura 7 mostra o resultado do teste de reatividade ao 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.

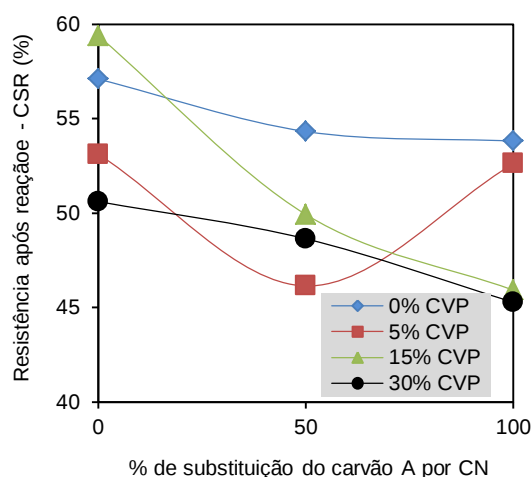
Figura 7. Influência da substituição de carvão importado por nacional na reatividade (CRI) do coque.



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 CO_2 . Essa reação é desejada, uma vez que produz gás redutor (CO) para a redução do minério de ferro. No entanto, coques que apresentam elevada reatividade estão sujeitos uma maior degradação granulométrica, devido à fragilização de sua estrutura carbonosa. A Figura 8 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 (MENÉNDEZ et al., 1999; WANG et al., 2016). Estudos futuros serão realizados para se avaliar os mecanismos que causam a elevação da reatividade.

Figura 8. Influência da substituição de carvão importado por nacional na 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 como maior uma 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.

5 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

ALVAREZ, R.; PIS, J.J.; DIEZ, M.A.; BARRIOCANAL, C.. CANGA, C.S.; MENÉNDEZ, J.A. A semi-industrial scale study of petroleum coke as an additive in cokemaking. FUEL PROCESSING TECHNOLOGY.PP 129-141, 1997.

ASTM D3176, 1989, Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke

ASTM D 4239, 2004, Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High Temperature Tube Furnace Combustion.

BRITISH PETROLEUM. Statistical Review of World Energy – June 2016. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf>

DNPM Balanço Mineral Brasileiro 2001Disponível em:

<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001>.

Data de acesso: 01/15/2017

FLORES, B.D., FLORES, I.V., GUERRERO, A., ORELLANA, D.R., POHLMANN, J.G., DIEZ, M.A., BORREGO, A.G., OSÓRIO, E., VILELA, A.C.F. Effect of charcoal blending with a vitrinite rich coking coal on coke reactivity. Fuel Processing Technology 155 (2017) 97-105.

IABr. Instituto aço Brasil. Anuário estatístico 2016.

JARDIM, J.C, 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, 2013.

KALKREUTH, W., HOLZ, M., LERN, M., MACHADO, G., MEXIAS, A., SILVA, M.B., WILLET, J., FINKELMAN, R. & BURGER, H. Petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin:1. Santa Terezinha, Leão-Butiá and Candiota Coalfields, Rio Grande do Sul, Brazil. , Brazil. International Journal of Coal Geology. 2006

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.

MARANHA, Silvio Pereira Diniz. Efeito da utilização de material inerte nas misturas de carvão a coqueificar. 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, 2011.

MENÉNDEZ JA, ALVAREZ R, PIS JJ. Determination of metallurgical coke reactivity at INCAR: NSC and ECE-INCAR reactivity tests. *Ironmaking Steelmaking*

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.

OLIVEIRA, M.L.S, WARD, C.R, SAMPAIO, C.H, QUEROL, X, CUTRUNEO, S.R.T., SILVA, L.F.O. Partitioning of mineralogical and inorganic geochemical componentes of coals from Santa Catarina, Brazil, by industrial beneficiation processes. *International Journal of Coal Geology*, 2013.

OSÓRIO, E; et al. Evaluation of petrology and reactivity of coal blends for use in pulverized coal

injection (PCI). *International Journal of Coal Geology* 68 (2006) 14–29.

OSÓRIO, E. Utilização de Carvões da Jazida de Chico-Lomã para a Produção de Coque. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.

SILVA, M.B, 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. *Internacional Journal of Coal Geology*., 2008.

ZANCAN F.L. Southern Brazil's role as an established generator of coal fired thermal power. Disponível em: http://www.carvaomineral.com.br/arquivos/coaltrans_brazil.pdf

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* 182 (2016) 879-885.

1999;26:117–21.