

## ADIÇÃO DE ÓLEO PARA AUMENTO DA DENSIDADE DE CARGA NA COQUERIA\*

Diego Canez Fernandes<sup>1</sup>  
Henriquison Bottrel Reis<sup>2</sup>  
Mauricio Covcevich Bagatini<sup>3</sup>

### Resumo

As técnicas que visam aumentar a densidade de carga possibilitam elevar a produtividade da coqueria e, além disso, permitem utilizar carvões com menor poder coqueificante. O aumento de densidade pode contribuir ainda para a obtenção de um coque de melhor qualidade, o que contribui para a redução do *coke rate* no alto-forno. Uma alternativa para aumentar a densidade de carga é a adição de óleo na mistura de carvões, o que reduz a tensão superficial da água, permitindo uma maior aproximação entre as partículas e favorecendo o contato efetivo durante a fase plástica. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da adição de óleo na densidade de carga para diferentes condições de granulometria e umidade do carvão empregado. Para isso foram realizados ensaios para medir a densidade de carga em três níveis de umidade (8%, 10% e 12%) e granulometria (82%, 85% e 88% < 2,83 mm). Posteriormente, foram realizados ensaios de coqueificação em escala piloto, e o coque produzido foi avaliado quanto ao  $DI_{15/150}$  (*drum index*), CRI (*coke reactivity index*) e CSR (*coke strength reaction*). Os resultados mostraram que a adição gradativa de óleo promoveu aumento na densidade de carga enquanto a elevação da umidade do carvão e seu afinamento provocou a redução desse parâmetro. A qualidade metalúrgica do coque aumentou com a elevação da densidade de carga demonstrando que essa é uma técnica com potencial de uso em plantas industriais.

**Palavras-chave:** Carvão, Densidade de Carga; Adição de óleo, Qualidade do coque.

### OIL ADDITION TO INCREASE THE BULK DENSITY IN COKE OVEN

#### Abstract

The techniques that increase the bulk density of coal become possible the increase of coking plant productivity and, in addition, allow the use of poor caking coals. The increase in bulk density improves the coke strength, which contributes to the decrease of coke rate in the blast furnace. An alternative to increase the bulk density is the addition of oil in the coal, which reduces the surface tension of the water, allowing a greater approximation between the particles and favoring the effective contact during the plastic phase. In this context, the present study has the objective to show the addition of oil effect on the bulk density, varying the coal particle size and moisture. Bulk density tests were performed at three levels of moisture and particle size (<2.83 mm). Afterwards, cokes were produced on a pilot coke oven and were evaluated for its quality ( $DI_{15/150}$ , CSR and CRI). The results showed that the gradual oil addition promoted an increase on bulk density while rising coal moisture and reducing particle size caused its decrease. The coke strength (DI and CSR) was improved with the bulk density increase, showing the feasibility of this technique.

**Keywords:** Coal; Bulk density; Oil addition; Coke Quality.

<sup>1</sup> Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Produção, Gerência Técnica da Área de Redução, USIMINAS, Ipatinga, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, M. Sc., Pesquisador, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalurgista, Dr.Sc., M.Sc., Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O coque tem um grande impacto no custo do ferro-gusa e suas propriedades desempenham um papel importante no processo de alto-forno. A otimização da produção e uso do coque é crucial para a competitividade e sustentabilidade das usinas siderúrgicas, especialmente no Brasil, onde o carvão metalúrgico é importado.

Ampliar a utilização de carvões *soft* e reduzir a participação dos carvões *hard* é um caminho que tem sido estudado nas últimas décadas. Em contrapartida, a qualidade do coque vem sendo cada vez mais exigida no processo de produção de gusa no alto-forno. Em geral, a qualidade do coque é avaliada a partir dos seguintes parâmetros: resistência mecânica a frio (DI), granulometria, porosidade, reatividade com CO<sub>2</sub> (CRI), resistência após reação ao CO<sub>2</sub> (CSR) e análise química. Um coque de boa qualidade é capaz de garantir a alta produtividade de um alto-forno mantendo baixo seu *coke rate* (taxa de consumo de coque por tonelada de ferro-gusa produzido).

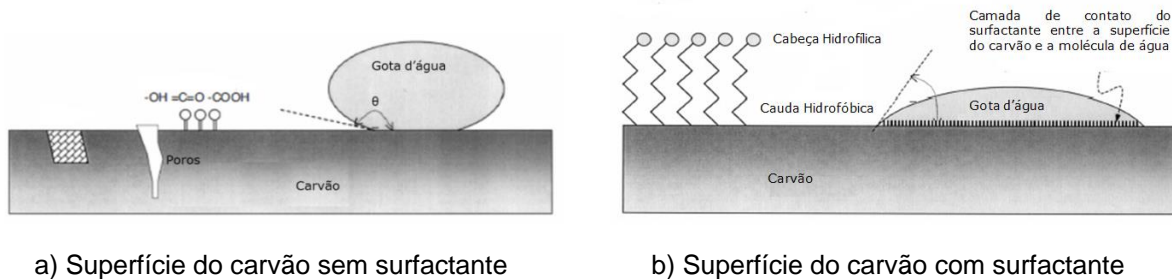
A qualidade do coque, especialmente a resistência mecânica a frio, é governada pela densidade de carga. O aumento da densidade resulta em uma maior proximidade das partículas de carvão durante a coqueificação, levando a uma forte ligação interpartículas no coque [1,2]. Além disso, o coque produzido a partir de misturas com maiores densidades é menos poroso, o que é benéfico para a sua resistência mecânica [3]. A utilização de técnicas de adensamento como a pré-secagem do carvão [4], *stamp charging* [5], briquetagem parcial [6,7] e adição de óleo [8, 9, 10], são indicadas para o aumento da produtividade e da qualidade do coque.

Na técnica de adição de óleo na mistura de carvões, o óleo atua como uma substância tensoativa ou surfactante proporcionando aumento da densidade. Os surfactantes são materiais que podem reduzir a tensão superficial da água em baixas concentrações devido à estrutura de suas moléculas, que consistem em duas regiões distintas: uma apolar, que é hidrofóbica (hidrocarbonetos de cadeia longa), e outra polar ou iônica, que é hidrofílica [11].

Segundo Nkolele [11], os surfactantes alteram a região de superfície modificando as forças nos limites de fase. Quando dissolvidos em água, suas moléculas tendem a arranjar-se de modo a minimizar a repulsão entre os grupos hidrofóbicos e a água, diminuindo a tensão superficial e alinhando-se ao longo da interface água-ar. A parte polar adere à fase aquosa e a parte apolar hidrofóbica fica voltada para o ar, para longe da água. Na maior parte da água eles formam aglomerados, chamados micelas, com a extremidade apolar apontando para o centro e a extremidade polar em direção ao lado oposto. Se entrarem em contato com uma superfície sólida as moléculas de surfactante adsorvem nessa superfície e sua orientação vai depender se a mesma é hidrofílica ou hidrofóbica. Com isso, os surfactantes mudam a natureza da superfície sólida, que pode ser quantificada pela alteração do ângulo de contato  $\theta$  (ângulo entre o contorno da superfície de uma gota e a interface líquido/sólido).

A superfície do carvão é considerada como hidrofóbica, isto é, repelente a água. Uma gota de água em uma superfície de carvão apresentaria um alto ângulo de contato  $\theta$ , como indicado na figura 1(a). Se um surfactante for adicionado, torna a superfície hidrofóbica mais hidrofílica, fazendo com que a gota de água se espalhe na superfície, com menor  $\theta$ , como mostrado figura 1(b). Este efeito permite uma

maior aproximação entre as partículas de carvão, reduzindo o seu ângulo de acomodação (ou repouso) e elevando a densidade [11].



**Figura 1.** Representação esquemática da superfície do carvão (a) sem surfactante e (b) com surfactante [11].

Fatores como umidade e a granulometria dos carvões influenciam fortemente os processos de adensamento. Em geral, reduzindo o tamanho da partícula do carvão diminui a densidade de carga e a magnitude desse efeito está relacionada à umidade do carvão. Segundo Carias et. al. [7], até determinado teor de umidade, a água repele as partículas de carvão devido ao seu comportamento hidrofóbico, aumentando a distância entre as partículas e, conseqüentemente, diminuindo a densidade. Por outro lado, o excesso de umidade promove a aglomeração das partículas de carvão, com a água atuando como ligante, formando pseudopartículas e reduzindo a distância entre as partículas, promovendo um leve aumento da densidade.

O aumento da densidade com redução da granulometria se deve ao fato de que, quando as partículas de carvão são divididas, a área de superfície total e o número de espaços livres entre as partículas aumentam e assim, aumentam o volume ocupado pela massa de carvão, diminuindo a densidade [7].

O aumento da densidade, além de elevar a quantidade de carga enforada, resultando em ganho de produtividade, pode proporcionar ganhos de resistência mecânica do coque (DI<sub>15-150</sub> e CSR) [2]. Sabadini et al. [10] relatou aumento de 3,9% na carga por forno e 1,4% na qualidade do coque (DI) em testes industriais com adição de óleo diesel.

Embora diversos pesquisadores indiquem os ganhos mencionados através da adição de óleo, é fundamental considerar as circunstâncias particulares de cada usina e obter dados experimentais preliminares e em menor escala para viabilizar a implementação dessa técnica em nível industrial. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o efeito da adição de óleo diesel sobre a densidade de carga, variando-se a granulometria e umidade do carvão.

## 2 MATERIAS E MÉTODOS

### 2.1 Matérias-primas

Os materiais (carvão e óleo diesel) utilizados no estudo são empregados em escala industrial na fabricação de coque para alto-forno. Trata-se de um carvão médio volátil de origem canadense coqueificável, que é usualmente utilizado nas coquearias. Já o óleo diesel é do tipo comum S-500 (teor máximo de enxofre de 500 p.p.m), com viscosidade de 2,0 a 5,0 centistokes à 40°C, com ponto de fulgor de 38°C e

densidade relativa de 815 a 865 kg/cm<sup>3</sup>. A tabela 1 apresenta as principais propriedades químicas e de plasticidade do carvão utilizado nos testes.

**Tabela 1.** Características químicas e plásticas do carvão

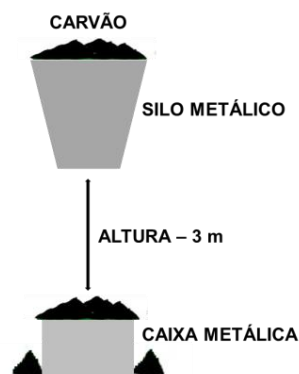
Parâmetro	Valor
Cinza (%)	9,1
Matéria volátil (%)	24,6
Reativos (%)	68,9
Inertes (%)	31,1
Fluidez máxima (log ddpm)	2,1
Reflectância (%)	1,17

## 2.2 Ensaios de densidade de carga

O carvão foi inicialmente cominuído em um britador de impacto para adequar sua granulometria. Em seguida o material foi direcionado para um misturador para homogeneização e nessa etapa foi coletada uma amostra representativa (aproximadamente 100 g) para verificar a sua umidade inicial através do aquecimento em estufa a 120°C por um período de 20 a 30 minutos. Posteriormente, água foi adicionada para ajuste de umidade e a massa úmida de carvão foi novamente submetida ao misturamento. Por último, adicionou-se o óleo e a massa de carvão foi novamente homogeneizada no misturador.

Para determinar a densidade de carga do carvão, variou-se o nível de umidade (8%, 10% e 12%), a granulometria (82%, 85% e 88% < 2,83 mm) e a quantidade de óleo adicionado (sem óleo, 1,0 l/t; 1,5 l/t e 2,0 l/t).

Nesse ensaio uma amostra de 50 kg foi colocada em um silo metálico e elevada a uma altura de 3 metros (figura 2). Após atingir essa altura a comporta inferior foi aberta e assim o material caiu em queda livre sendo conduzido por um cone de plástico até uma caixa metálica retangular de 404 x 303 x 291 mm (comprimento x largura x altura) e volume de 0,03564 m<sup>3</sup>. Depois disso, o material foi nivelado na caixa e pesado. Esses testes foram realizados em duplicata e caso a diferença entre os dois resultados fosse superior a 9,6 kg/m<sup>3</sup>, um novo ensaio era realizado. O resultado de densidade de carga é a razão entre a média das massas concentradas na caixa, medidas nos 2 testes, e o volume da caixa.



**Figura 2.** Ensaio para determinação da densidade de carga.

## 2.3 Fabricação do Coque Piloto

Com base nos resultados obtidos de densidade, foram realizados enforamentos no forno piloto de coqueificação visando avaliar o efeito da densidade de carga na qualidade do coque, variando a granulometria (82%, 85% e 88% < 2,83 mm) e adição de óleo (sem óleo, 1,0 l/t; 1,5 l/t e 2,0 l/t) e mantendo o teor de umidade a 8,0%. Para esses testes, a densidade foi ajustada visando a representar os ganhos obtidos na etapa anterior.

O forno piloto utilizado nesse estudo possui as seguintes características:

- distância entre paredes externas: 460 mm;
- distância entre paredes internas (de aquecimento): 300 mm;
- altura da câmara de coqueificação: 400 mm;
- volume útil da câmara de coqueificação: 0,0552 m<sup>3</sup>.
- aquecimento: elétrico;
- elemento de aquecimento: resistência tipo Kanthal (diâmetro 3 mm e 8 ohms);
- temperatura das paredes de aquecimento (nominal): 1.000°C;
- temperatura das paredes de aquecimento (máximo): 1.050°C.

Para a produção do coque, o carvão foi inserido no forno piloto com temperatura de 1.000°C nas paredes, permanecendo por um período de nove horas, o que confere a temperatura no centro da carga de 950°C. Ao término desse período, o coque foi retirado e encaminhado para as etapas de extinção com água (cerca de 5 minutos) e secagem em estufa. Posteriormente, o coque piloto foi submetido a análises de resistência mecânica (DI<sub>15-150</sub> – *Drum Index*), conforme norma JIS K 2151 [12], e reatividade ao CO<sub>2</sub> (CRI – *Coke Reaction Index*) e resistência do coque após reação (CSR – *Coke Strength After Reaction*), baseado na norma ASTM D5341 [13].

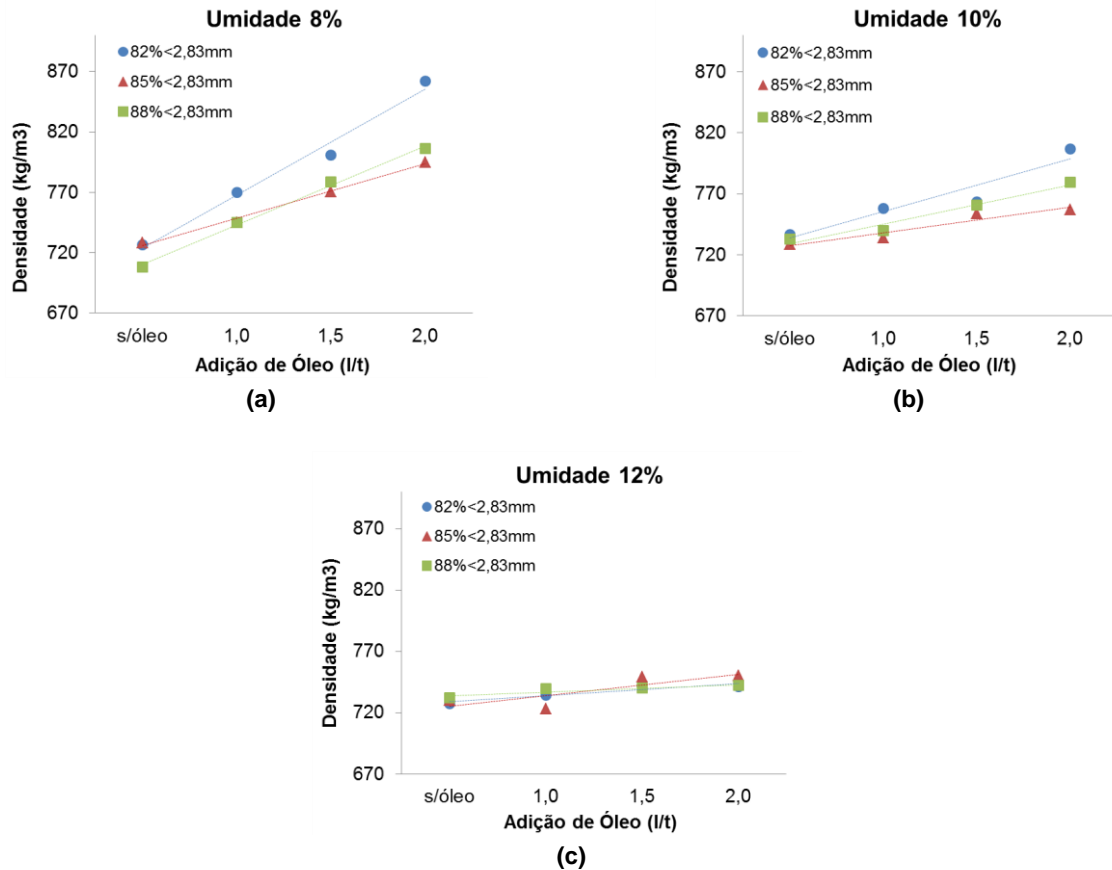
## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Influência da granulometria, umidade e adição de óleo na densidade de carga

Na figura 3 é mostrado o efeito da adição de óleo na densidade, para os três níveis de umidade e de granulometria avaliados. De modo geral, os resultados mostram que a densidade do carvão aumenta com o aumento da adição de óleo. Contudo, observa-se que essa tendência foi mais significativa para os menores níveis de umidade e maior granulometria. Nota-se ainda que, para as três granulometrias avaliadas, o máximo valor de densidade ocorreu em condições de maior adição de óleo (2,0 l/t) e menor umidade do carvão (8%). A elevação da densidade com a adição de óleo é atribuída à concentração do surfactante (óleo) no filme de água que envolve as partículas, diminuindo a tensão superficial da água e melhorando o contato entre elas.

Nota-se que em todos os níveis de granulometria, as curvas mostraram uma tendência de redução de densidade com o aumento de umidade, causado pela repulsão das partículas de carvão (hidrofóbicas) pela água. Esses resultados estão de acordo com a literatura [7,9], que cita ainda que, a continuidade do aumento da umidade provoca uma tendência de elevação da densidade. Contudo, não foi observada essa tendência para os teores de umidades avaliados neste trabalho.

Nota-se ainda que, para o nível com 12% de umidade (figura 3(c)), não houve variação significativa de densidade com o aumento da adição de óleo.



**Figura 3.** Efeito da adição de óleo na densidade para diferentes condições de umidade e granulometria do carvão.

Em termos de granulometria, os resultados mostraram que a densidade diminui na medida em que ocorre o afinamento do carvão (82% para 88% < 2,83 mm), passando por um valor mínimo na faixa de 85% < 2,83 mm quando óleo é adicionado (1,0 l/t, 1,5 l/t e 2,0 l/t). O ligeiro aumento da densidade obtido de 85% para 88% < 2,83 mm pode ser atribuído ao efeito do maior empacotamento das partículas de carvão, relacionado à distribuição de tamanho das partículas e ocupação dos vazios por partículas mais finas, quando adiciona-se óleo. No trabalho de Kerkkonen [8], observa-se efeito similar a este caso. A redução da densidade com o afinamento do carvão (maior valor de < 2,83 mm) se deve ao aumento da fração de vazios no material, que aumenta o volume ocupado pela massa de carvão [7].

Observa-se ainda que para todos os níveis de granulometria, a densidade aumenta com a elevação da adição de óleo, sendo mais significativa com umidade a 8%. Conforme se aumenta a umidade, a variação entre os resultados se torna menos expressiva e, em 12%, não foi observado variação significativa. Destaca-se que a densidade máxima de 862,2 kg/m<sup>3</sup> foi obtida para o nível de granulometria 82% < 2,83 mm, 8% de umidade e adição de óleo de 2,0 l/t, e corresponde ao aumento de 18,7% em relação à densidade dessa mesma carga sem óleo. Para os níveis de 85% < 2,83 mm e 88% < 2,83 mm, com mesma adição de óleo e umidade, foram obtidos ganhos de 9,2% e 13,9%, respectivamente.

### 3.2 Influência do aumento de densidade de carga na qualidade do coque

Os resultados quanto ao DI, CRI e CSR do coque produzido no forno piloto são apresentados na tabela 2.

**Tabela 2.** Resultados de qualidade do coque

Granulometria (<2,83mm)	Adição de Óleo (l/t)	Densidade obtida nos testes (kg/m <sup>3</sup> )	DI (%)	CSR (%)	CRI (%)
82%	sem óleo	726,29	76,70	54,47	29,70
	1,0	769,64	79,45	55,00	29,78
	1,5	800,51	82,30	61,70	27,39
	2,0	862,23	82,60	63,18	26,15
85%	sem óleo	728,25	80,00	57,89	27,57
	1,0	745,09	80,50	56,77	29,56
	1,5	770,62	81,00	58,01	28,60
	2,0	795,03	81,55	58,71	29,00
88%	sem óleo	708,05	79,00	52,80	29,53
	1,0	744,67	78,95	56,41	29,90
	1,5	778,62	80,10	55,72	29,21
	2,0	806,12	81,00	59,57	29,10

A adição de óleo no carvão, responsável pelo aumento de densidade de carga, promoveu um efeito significativo de melhoria no DI (figura 4). Observa-se ainda que a elevação da quantidade de óleo até 1,5 l/t (maior densidade), associada a uma granulometria mais grosseira (reduzindo de 88% para 82% < 2,83 mm) promoveu melhoria significativa na resistência mecânica (DI) e que, o aumento da adição de óleo de 1,5 l/t para 2,0 l/t não proporcionou ganho significativo de qualidade. Esse ganho deve ser resultado do efeito da aproximação das partículas de carvão promovido pelo aumento da densidade, que garantem o contato efetivo durante a fase plástica, produzindo um coque mais resistente.

Para as três faixas granulométricas avaliadas, os resultados sem adição de óleo mostraram que o afinamento do carvão, tende a aumentar o DI. Esses resultados estão de acordo com a literatura [2,7], pois o afinamento da granulometria reduz o tamanho das partículas dos constituintes inertes (macerais e matéria mineral) que vão diminuir os possíveis pontos de nucleação de trincas no coque (menos fissuras) que concorrem para o aumento da resistência mecânica.

O melhor resultado de DI (82,60%) foi obtido com adição de 2,0 l/t e 82% < 2,83 mm, que significa ganho de 5,9% em relação ao coque obtido sem adição de óleo. Para os níveis de granulometria de 85% e 88% < 2,83mm com adição de 2,0 l/t, foram obtidos ganhos no DI de 1,55% e 2,00%, respectivamente.

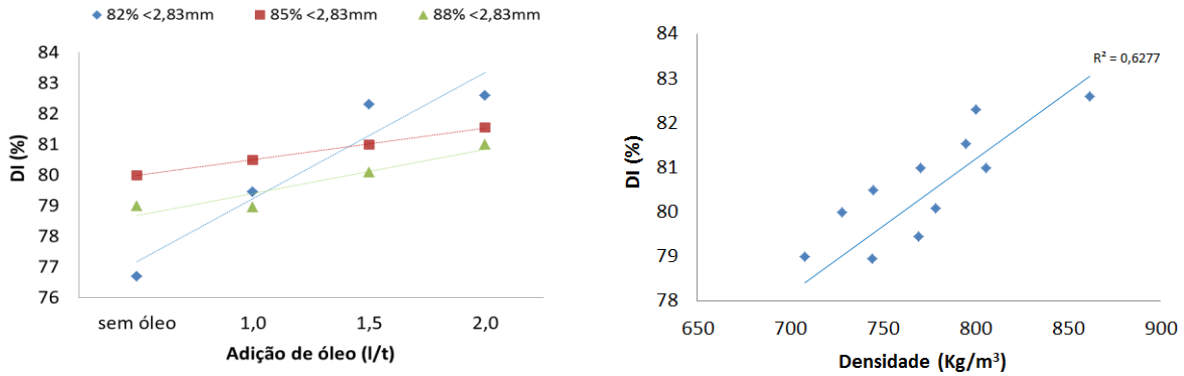


Figura 4. DI em função da adição de (a) óleo e (b) densidade.

Os resultados de reatividade e de resistência após a reação ao CO<sub>2</sub> do coque produzido (CRI e CSR) são mostrados nas figuras 5 e 6, respectivamente. Os resultados da figura 5 demonstram a diminuição da reatividade com o aumento da densidade, exceto para nível de 85% < 2,83 mm, onde a variação foi mínima. Observou-se uma redução de 3,56% na reatividade na condição de maior densidade (82% < 2,83 mm e adição de 2,0 l/t) em relação ao coque sem adição de óleo. Observa-se que a variação do CSR ocorreu de maneira semelhante à obtida na resistência mecânica a frio (DI). O melhor resultado de CSR foi obtido para o maior nível de densidade (862,23 kg/m<sup>3</sup> com adição de óleo 2,0 l/t e 82% < 2,83 mm), onde o ganho foi 8,71% no CSR em relação ao carvão sem adição de óleo. Nos níveis de 85% e 88% < 2,83 mm, para mesma quantidade de óleo, foram obtidos ganhos de 0,81% e 6,77%, respectivamente. O aumento da densidade melhora a adesão entre as partículas e produz um coque menos poroso, de menor área superficial, que diminui a reatividade ao CO<sub>2</sub> (*solution-loss*), conseqüentemente, elevando a resistência do coque após a reação ao CO<sub>2</sub> [14].

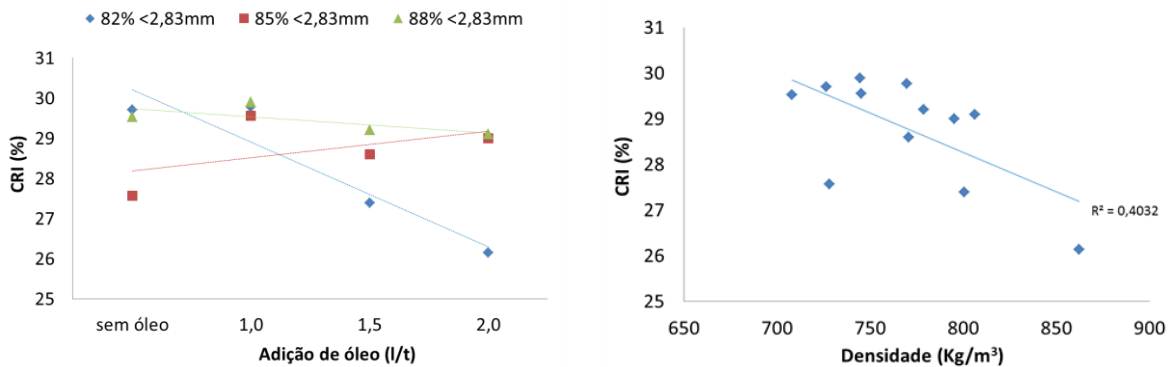


Figura 5. CRI em função da (a) adição de óleo e (b) densidade.



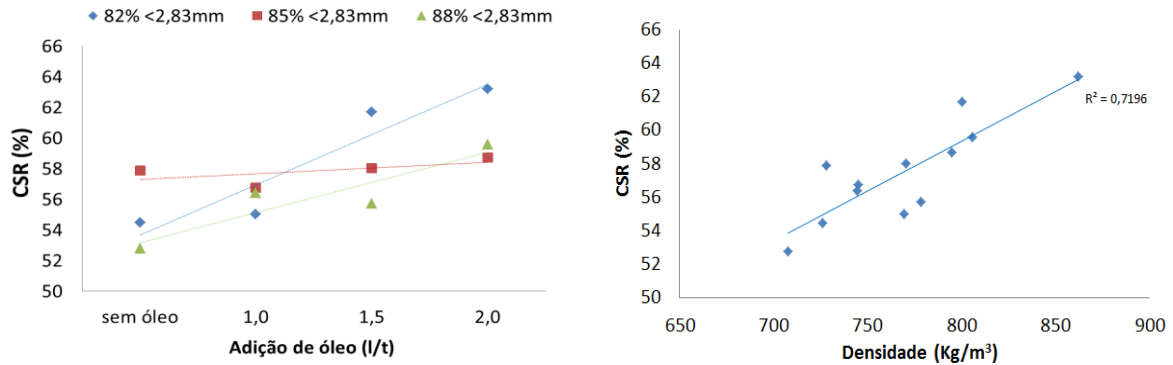


Figura 6. CSR em função da (a) adição de óleo e (b) densidade.

## 4 CONCLUSÕES

Para as condições testadas no presente trabalho, os resultados mostraram que o aumento da adição de óleo no carvão promoveu elevação da densidade. Já com o aumento do teor de umidade e o afinamento da granulometria do carvão observou-se a diminuição da densidade de carga. O valor máximo de densidade foi obtido nas condições de maior adição de óleo (2,0 l/t), granulometria de 82% < 2,83 mm e umidade do carvão de 8%.

O aumento da densidade promoveu maior resistência do coque, tanto no DI quanto no CSR, e uma queda de reatividade ao CO<sub>2</sub>. Para a condição de maior densidade (82% < 2,83 mm e 8% de umidade) foram obtidos ganhos com adição de 2,0 l/t de até 5,90% no DI e 8,71% no CSR, em relação ao coque obtido sem adição de óleo.

## REFERÊNCIAS

- 1 ULHOA, M.B. Carvão Aplicado à Fabricação de Coque de Alto-Forno. Coal & Coke e-Mentoring LTDA. 2011. 123 p.(Material de treinamento).
- 2 KUMAR,P.P; VINOOU, D.S.; YADAV, U.S.; GHOSH, S.; LAL, J.P.N. Optimisation of coal blend and bulk density for coke ovens by vibrocompacting technique non-recovery ovens. Ironmaking & Steelmaking, 34:5, 431-436, 2007.
- 3 LOISON, R. et al. Coke Quality and Production. 2<sup>nd</sup> Ed. Paris: Butterworth, 1989.
- 4 KATO, K.; YAMAMURA, Y.; NAKASHIMA, Y. Development of Dry-cleaned and Agglomerated Pre-compaction System (DAPS) for Metallurgical Cokemaking. Nippon Steel Technical Report, n. 94, p. 42-46, 2006.
- 5 MADIAS, J., CÓRDOVA, M. A Review on Stamped Charging of Coals. 43º Ironmaking and Raw Materials Seminar. Belo Horizonte. (pp. 30-43). 2013.
- 6 OLIVEIRA, R.S. Produção de Coque Metalúrgico Através da Utilização Parcial de Briquetes de Carvão Mineral, Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto. 2017. 104 p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
- 7 CARIAS, M.C; Braga, E.M.H, Silva, G.L.R; Amaral, R. C. V.; Assis, P. S.; Lemos, L. R. Efeito do Tamanho de Partícula e da Umidade sobre a Densidade de Mistura de Carvão e seu Impacto sobre a Qualidade do Coque, p. 45-56. In: 48º Seminário de Redução de Minérios e Matérias-primas, São Paulo, 2018.
- 8 KERKKONEN, O. Oil Addition to the Coal Blend at the Ruukki Coking Plant. ECIC, European Coke and Ironmaking Congress, 5, p. 1-11; 2005.

- 9 FRAHLICHOVÁ, M.; KUCKOVÁ, A.J.; FINDORÁK, R. – Possibilities of Increasing Coal Charge Density by Adding Fuel Oil. ISSN (1897 – 3310) Volume 10, ISSUE Special 1/2010 377-380, 2010.
- 10 SABADINI, M. B.; FERNANDES, D. C.; REIS, H. M. B. Adição de Óleo na Mistura de Carvões para Fabricação de Coque na Usiminas Ipatinga. Contribuição Técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas. ABM, Belo Horizonte, 2013.
- 11 NKOLELE, A. Investigations into the reduction of moisture in fine coal by plant tests with surfactants. The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, P 171 -176,2004.
- 12 JIS K2151, 2004. Coke – testing methods. Japanese Industrial Standard.
- 13 ASTM D5341/D5341M, 2014. Standard Test Method for Measuring Coke Reactivity Index (CRI) and Coke Strength after Reaction (CSR). American Society for Testing and Materials.
- 14 MHLWAZI, S. N.; Kruse, R.; Mastalerz, M.; Bish, D.L. Impact of Oven Bulk Density and Coking Rate on Stamp-Charged Metallurgical Coke Structural Properties. Energy&Fuels, American Chemical Society Publications, 27, P. 7876 a 7884, 2013.