

Efeito de finos de coque e do recobrimento em quase-partículas

*

Arthur Felipe Lino Oliveira¹
Rafael Adriano Lopes Júnior²
Ismael Vemdrame Flores²
Maurício Covcevich Bagatini³

Resumo

O processo *Hybrid Pelletized Sinter* (HPS), rota de sinterização híbrida na qual a aglomeração a frio de minério acontece em duas etapas, foi uma das tecnologias desenvolvidas para lidar com aglomeração de minérios de ferro com elevados percentuais de ultrafinos. Após a formação dos grânulos por essa rota, existe uma etapa denominada *coating*, caracterizada por um recobrimento desses com finos de coque. Diversos autores comprovaram o aumento da eficiência de combustão quando esse recobrimento é feito, porém pouco se sabe a respeito do seu efeito na aglomeração a frio. Dentro desse cenário, com objetivo de identificar o efeito dos finos de coque na granulação e no recobrimento das quase-partículas foi realizado ensaios de aglomeração a frio conduzidos em uma rota HPS de escala laboratorial. Os resultados mostraram que misturas contendo o coque no interior dos aglomerados diminuem seus tamanhos e os fragilizam. Além disso, as partículas de coque para o recobrimento devem ter granulometria aderente (<0,2 mm) para que esse ocorra, mas que elas se desprendem no processo de queda.

Palavras-chave: Processo HPS; Recobrimento ; Finos de coque; Sinterização.

Effect of coke breeze and coating on quasi-particles

Abstract

The Hybrid Pelletized Sinter (HPS) process, a hybrid sintering route in which the cold agglomeration of ore takes place in two stages, was one of the technologies developed to deal with the iron ore agglomeration with high percentages of ultrafines. After the formation of the granule by this route, there are its coating with coke breeze. Several authors have confirmed the increased combustion efficiency when this coating is done, but little is known about its effect on cold agglomeration. In this scenario, in order to identify the coke breeze effect on the granulation and the coating of the quasi-particles, cold agglomeration tests were carried out on a laboratory-scale HPS route. The results showed that blends containing coke breeze within the agglomerates decrease their size and weaken them. In addition, the coke breeze for the coating should have adherent particle size (<0.2 mm) for this to occur, but that they fall apart in the process of falling.

Keywords: HPS process; Coating; Coke breeze; Sintering.

¹ Graduando em Engenharia Metalúrgica, Laboratório de Processos Metalúrgicos (LAPROMET), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

² Pós-Graduando em Metalurgia Extrativa, Laboratório de Processos Metalúrgicos (LAPROMET), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

³ Professor Doutor em Engenharia Metalúrgica, Laboratório de Processos Metalúrgicos (LAPROMET), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

As reservas de minério de ferro disponível mundialmente vêm sofrendo mudanças consideráveis em sua composição, aumentando a quantidade de impurezas no minério. Assim, mais etapas de cominuição e concentração são necessárias, aumentando a fração de ultrafinos (<0,150 mm) produzidos, inapropriados para uso direto nos reatores de redução. O processo de sinterização, que consiste em submeter uma mistura de matérias-primas a uma semifusão redutora-oxidante a temperaturas da ordem de 1200 a 1400°C, tem como principal objetivo aglomerar os finos e ultrafinos de minério de ferro [1]. Nesse sentido, novas tecnologias de granulação e sinterização vêm sendo desenvolvidas para possibilitar o uso de maiores porcentagens de ultrafinos, como o processo *Hybrid Pelletized Sinter* (HPS) [2].

O processo HPS é uma rota de sinterização híbrida na qual a aglomeração a frio de minério acontece em duas etapas: Uma etapa primária de aglomeração em tambor seguida pela granulação em um disco pelletizador. Os aglomerados formados, denominados quase-partículas (também chamados de grânulos), são encaminhados a uma etapa do processo de recobrimento chamada *coating*, onde os mesmos são recobertos por combustíveis sólidos [3].

Diversos pesquisadores comprovaram os benefícios do recobrimento com coque para o processo de sinterização. Segundo Higuchi *et al.* [4], quando coque é adicionado à mistura a ser aglomerada, existe a possibilidade do mesmo atuar como uma partícula nucleante na formação das quase-partículas, reduzindo a resistência do sinter após a queima. No entanto, com o uso de recobrimento, o posicionamento do combustível na superfície das quase-partículas melhora a eficiência de combustão durante a sinterização, aumentando a produtividade da sinterização e melhorando as características do sinter produzido [5,6]. Além disso, Oyama *et al.* [7] mostraram que o sinter formado com quase-partículas recobertas com coque contribui positivamente para a operação dos altos fornos.

Ainda que a literatura apresente diversos artigos sobre o processo de recobrimento, pouco se conhece sobre seu efeito na aglomeração a frio de uma mistura a sinterizar, sendo a maioria dos trabalhos voltados para o estudo da combustão durante a sinterização. Com objetivo de entender melhor o comportamento das quase-partículas recobertas com coque, o presente artigo, através de um processo HPS em escala laboratorial, procura mostrar comparativos à frio de quase-partículas com e sem recobrimento, além do efeito do coque na mistura, como forma complementar à literatura.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

2.1.1 Matérias-primas

As matérias-primas utilizadas no presente trabalho foram fornecidas por uma usina siderúrgica integrada situada no estado de Minas Gerais. A análise granulométrica das matérias-primas (minério de ferro hematítico oriundo do quadrilátero ferrífero, finos de coque, sinter de retorno, cal, calcário, dolomita e carepa de laminação) é apresentada na Tabela 1. Para a etapa de recobrimento, foi feita a cominuição de

uma amostra de finos de coque para adequação a distribuição de 100% partículas aderentes (abaixo de 0,2mm), apresentada na Tabela 2.

Tabela 1. Distribuição granulométrica das matérias-primas

| % Retida acumulada | | | | | | | |
|--------------------|------------------|----------------|-------------------|------|----------|----------|--------|
| Malha (mm) | Minério de ferro | Finos de coque | Sínter de retorno | Cal | Calcário | Dolomita | Carepa |
| 8,0 | 2,23 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,77 |
| 5,6 | 7,42 | 0,38 | 7,84 | 0,00 | 2,93 | 3,01 | 3,04 |
| 3,36 | 16,09 | 5,41 | 26,56 | 0,00 | 19,76 | 20,05 | 8,11 |
| 2,0 | 26,33 | 20,73 | 59,80 | 0,00 | 36,43 | 34,10 | 21,46 |
| 1,0 | 37,17 | 41,18 | 80,50 | 2,13 | 49,61 | 59,85 | 46,08 |
| 0,5 | 47,84 | 63,47 | 92,05 | 5,57 | 57,52 | 66,85 | 69,04 |
| < 0,5 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Tabela 2. Distribuição granulométrica da amostra de Finos de Coque cominuída

| Malha (mm) | % Retida simples | % Retida acumulada |
|------------|------------------|--------------------|
| 0,106 | 32,79 | 32,79 |
| 0,53 | 22,77 | 55,56 |
| < 0,053 | 44,44 | 0,00 |

2.1.2 Aglomeração a frio

Para os testes de aglomeração a frio, foi usado uma mistura correspondente à uma típica mistura industrial para sinterização, apresentada na tabela 3.

Tabela 3. Proporções de matérias-primas em uma mistura industrial para sinterização

| Minério de ferro | Finos de coque | Sínter de retorno | Cal | Calcário | Dolomita | Carepa |
|------------------|----------------|-------------------|-------|----------|----------|--------|
| 61,0 % | 3,6 % | 26,0 % | 3,5 % | 2,6 % | 2,5 % | 0,8 % |

Para avaliar o comportamento das misturas com a introdução de coque metalúrgico de diferentes formas, quatro aglomerações foram realizadas. A primeira delas foi realizada para simular o processo de aglomeração das usinas siderúrgicas, com adição de finos de coque previamente a aglomeração, denominada de mistura base. Além disso, testou-se uma aglomeração sem adição de coque (chamada de mistura sem coque), uma aglomeração com adição de coque com granulometria fornecida para revestimento das quase-partícula (mistura *coating* grosso) e uma aglomeração com adição de coque cominuído para o revestimento das quase-partículas (mistura *coating* fino).

A aglomeração a frio foi feita em uma rota HPS em escala laboratorial e a Figura 1 mostra um esquema dos equipamentos usados. A granulação primária foi feita em um tambor rotativo com diâmetro de 20 cm, inclinado a 20°, a 20 rpm, por 6 minutos, no qual metade da quantidade total de água foi adicionada. Os aglomerados formados no tambor foram para um disco pelletizador de 60 cm de diâmetro, inclinado de 48° a 14 rpm, onde permaneceram por 4 minutos com inclinação de 48° e velocidade de 14 rpm, onde a segunda metade da água foi adicionada. A quantidade de água adicionada foi fixada para todos os testes a 7,4% em massa. O

recobrimento foi executado em um pneu pelotizador de 60 cm de diâmetro, com inclinação de 15º a 20 rpm por 50 segundos.

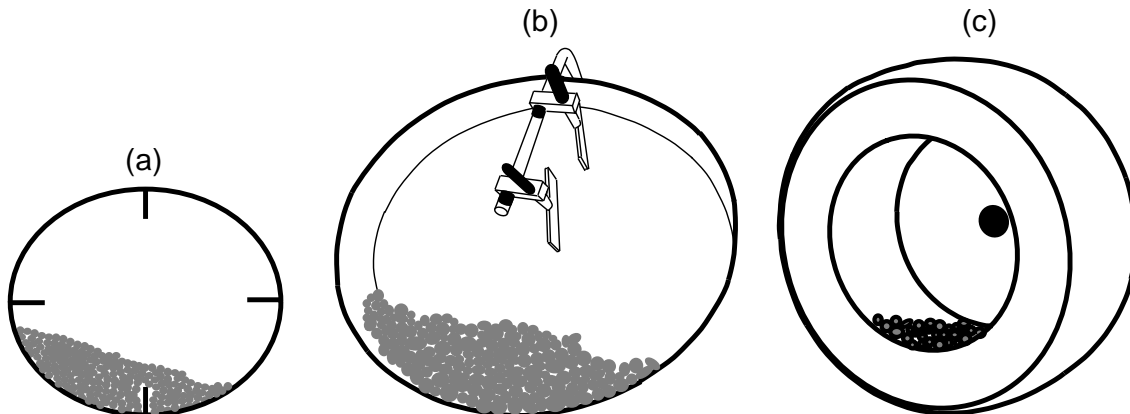


Figura 1. Equipamentos utilizados nos testes de aglomeração a frio sendo em (a) tambor, (b) disco pelotizador e (c) pneu pelotizador.

2.1.3 Avaliação das quase-partículas

Para avaliar o efeito da etapa de recobrimento sobre o processo de aglomeração e sobre a qualidade das quase-partículas formadas, as mesmas foram avaliadas quanto à sua distribuição granulométrica, resistência à degradação e sobre a permeabilidade a frio do leito de grânulos formado.

A distribuição granulométrica das quase-partículas foi obtida pela metodologia SAFE (*Safe Analysis on Frozen Elements*), em que as quase-partículas são congeladas durante 90 minutos e submetidas a um peneiramento de 10 minutos a 10000 vibrações por minuto [8]. A distribuição granulométrica obtida pelo método SAFE foi utilizada para o cálculo do índice de granulação (IG) [9], permitindo avaliar a qualidade do processo de aglomeração, através da equação 1.

$$IG = \frac{(A - B)}{A} \times 100 \quad (1)$$

Sendo A a massa de finos menores que 0,5 mm antes da aglomeração e B a massa de finos menores que 0,5 mm após a aglomeração.

Com o intuito de identificar a resistência a degradação das quase-partículas produzidas, ensaios de degradação foram feitos para todas as aglomerações. As quase-partículas foram submetidas a duas quedas consecutivas de uma altura de 1 metro, sobre uma chapa metálica. Após a degradação, os grânulos foram submetidos ao teste SAFE. Com os valores obtidos, calcula-se o índice de degradação (ID) pela Equação 2.

$$ID = \frac{(D_i - D_f)}{D_i} \times 100 \quad (2)$$

Sendo D_i diâmetro médio (mm) calculado dos grânulos antes da degradação e D_f diâmetro médio (mm) calculado dos grânulos após a degradação.

Os testes de permeabilidade foram realizados em um permeâmetro. Esse equipamento é composto por um tubo cilíndrico posicionado na vertical, com altura de 150 mm e diâmetro da seção transversal de 120mm. Na base do tubo tem um exaustor que succiona ar e, acoplado ao sistema, um sensor de pressão diferencial entre o topo e base do cilindro. Preenchendo todo o tubo com quase-partículas e variando a vazão do exaustor, curvas de *JPU* (*Japanese Permeability Unit*) que indicam a permeabilidade do leito de quase-partículas, podem ser construídas [10]. Os cálculos de *JPU* foram feitos com base na Equação 3:

$$JPU = \frac{F}{A} \left(\frac{L}{\Delta P} \right)^{0,6} \quad (3)$$

Na qual F é a vazão de ar (m^3/min), A é a área da seção transversal do leito (m^2), L é a altura do leito (mm) e ΔP é a queda de pressão através do leito (mmH_2O).

2.2 Resultados e Discussão

2.2.1 Distribuição granulométrica das quase-partículas

A Figura 2 mostra a distribuição granulométrica inicial e após degradação das quase-partículas formadas para as quatro misturas testadas.

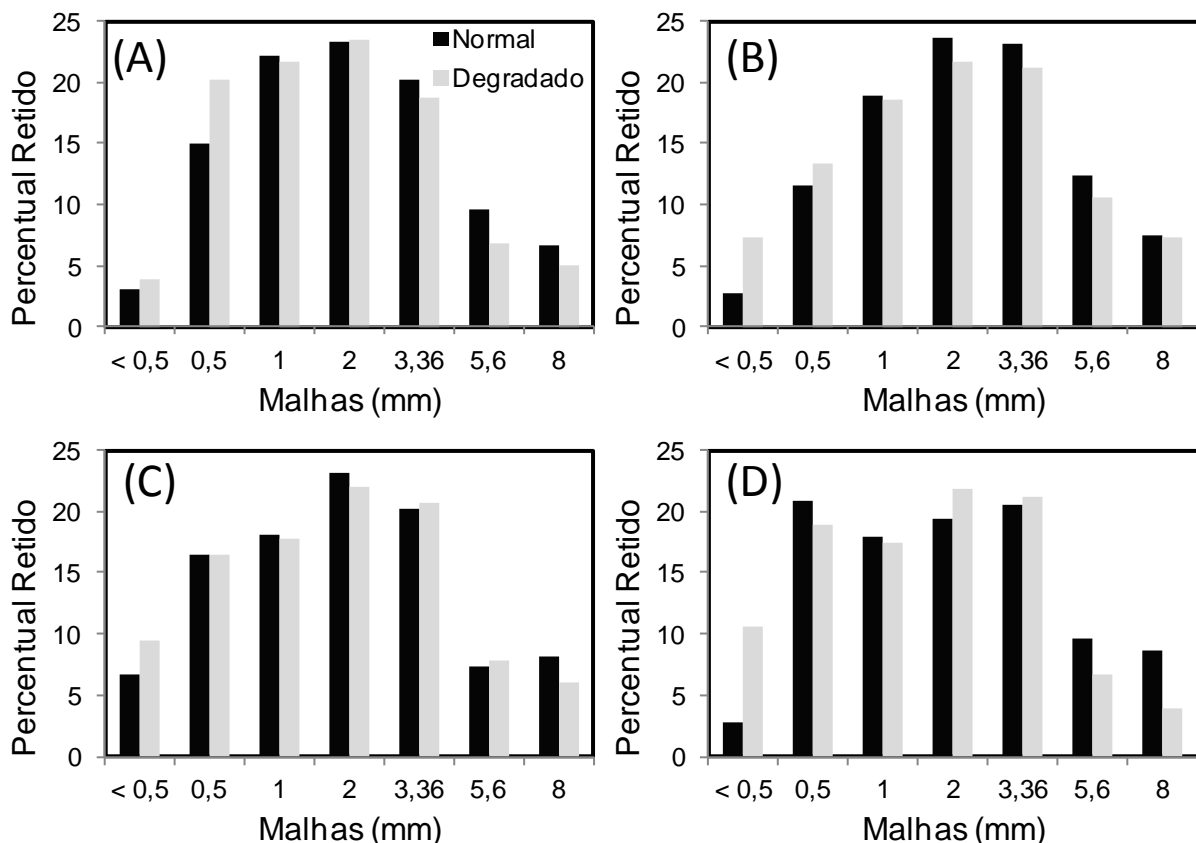


Figura 2. Distribuição granulométrica dos grânulos (A) base, (B) sem coque, (C) *coating* grosso e (D) *coating* fino

Analisando os gráficos sem degradação, nota-se que a mistura sem coque foi a que resultou em um maior número de quase-partículas acima de 5,6 mm, seguida pelas misturas *coating* fino, *coating* grosso e base. Tal resultado sugere que o

coque, quando adicionado na mistura a ser aglomerada, diminui o tamanho das quase-partículas formadas.

As misturas *coating* grosso e *coating* fino apresentaram percentuais intermediários de quase-partículas maiores que 5,6 mm, sendo que a primeira apresentou um percentual menor que a segunda. Acredita-se que isso aconteceu devido ao efeito das partículas mais grosseiras de coque que, na etapa de recobrimento, atuaram de forma mais abrasiva que as partículas mais finas, de modo a deteriorar a superfície das quase-partículas maiores. Além disso, a mistura *coating* grosso foi a que apresentou o maior percentual de finos abaixo de 0,5 mm, provavelmente pelo fenômeno de abrasividade anteriormente descrito, de modo que os finos menores que 0,5 mm são os mesmos gerados pela abrasão. Acredita-se também que parte dessas partículas menores que 0,5 mm fazem parte do coque ultrafino, presente no coque fornecido pela usina, e que deveriam ficar aderidas, mas que desprende devido a essa abrasividade.

A mistura *coating* fino apresentou um percentual abaixo de 0,5 mm equivalente a 2,8%, provando que os ultrafinos aderentes de coque adicionados na etapa de recobrimento aderiram à superfície das quase-partículas ao final da etapa.

2.2.2 Índice de aglomeração e avaliação do *coating*

A Tabela 4 mostra os índices de granulação (IG) de cada uma das aglomerações. A mistura base, sem coque e *coating* fino tiveram elevados IGs, ou seja, originaram uma boa aglomeração, com um baixo percentual (3,0 %, 2,8 % e 2,8%) de finos abaixo de 0,5 mm no final do processo. Já a mistura *coating* grosso teve o pior índice de granulação, com o dobro de finos (6,6 %) no final do processo em comparação com as demais.

Tabela 4. Índice de granulação dos aglomerados

| | IG |
|-----------------------|-------|
| Base | 92,57 |
| Sem coque | 93,00 |
| <i>Coating</i> grosso | 83,72 |
| <i>Coating</i> fino | 93,46 |

De modo geral, percebeu-se que com adição de coque 100% aderente é possível revestir as quase-partículas. Com o coque grosseiro não há revestimento, devido provavelmente à interação dos grãos grosseiros com as superfícies das quase-partículas, degradando-as. A Figura 3 comprova isso, de modo que as quase-partículas da mistura *coating* grosso tiveram a mesma aparência que as da mistura sem coque, e as quase-partículas da mistura *coating* fino tiveram uma coloração mais escura, devido a recobrimento com coque.



Figura 3. Quase-partículas mistura (A) *coating* fino, (B) *coating* grosso e (C) sem coque.

2.2.3 Degradação das quase-partículas no teste de queda

A Tabela 5 mostra o diâmetro médio das quase-partículas, antes e depois da queda, e o índice de degradação para cada mistura.

Tabela 5. Índice de degradação das quase-partículas

| | Diâmetro médio (mm) | | Índice de degradação (ID) |
|-----------------------|---------------------|----------------|---------------------------|
| | Sem degradação | Com degradação | |
| Base | 3,81 | 3,43 | 9,88 |
| Sem coque | 4,27 | 4,13 | 3,31 |
| <i>Coating</i> grosso | 3,84 | 3,70 | 3,50 |
| <i>Coating</i> fino | 3,85 | 3,37 | 12,50 |

Comparando a mistura base com a sem coque, podemos perceber que o coque fragiliza a quase-partícula, uma vez que as quase-partículas com coque em sua mistura, durante a granulação, degradaram mais do que as sem coque.

A aglomeração *coating* fino foi a que obteve a maior degradação. Partículas ultrafinas de coque, que aderiram à superfície das quase-partículas no processo de recobrimento se desprenderam no processo de queda. Isso pode ser visto na Figura 1 (D), em que o percentual de finos abaixo de 0,5 mm passou de 2,8%, antes da queda, para 10,5% depois da queda.

O mesmo não aconteceu com a aglomeração *coating* grosso, pois possivelmente ocorreu degradação no processo de recobrimento, ou seja, os finos que poderiam se desprender na queda já o fizeram no pneu. Dessa forma, a degradação foi baixa.

2.2.4 Permeabilidade a frio do leito de quase-partículas

As Figuras 4 e 5 mostram, respectivamente, as curvas de permeabilidade do leito de partículas ao final da aglomeração e após o teste de queda de cada aglomeração.

Sabe-se que a permeabilidade de um leito de partículas é influenciada principalmente por duas variáveis: a homogeneidade granulométrica do leito e a quantidade de finos presente neste. Quanto mais homogênea é a distribuição granulométrica de um leito, mais permeável. O contrário acontece quando se

umenta a porcentagem de finos do leito, sendo esses responsáveis pela diminuição da permeabilidade.

A porcentagem de finos é dada diretamente pela distribuição granulométrica. Para avaliar a homogeneidade do leito de quase-partículas, o critério usado foi de que quanto mais próxima a distribuição granulométrica se assemelhar de uma distribuição normal ou logarítmica, mais homogênea é essa distribuição, pois mais concentrada em uma faixa de tamanho ela estará.

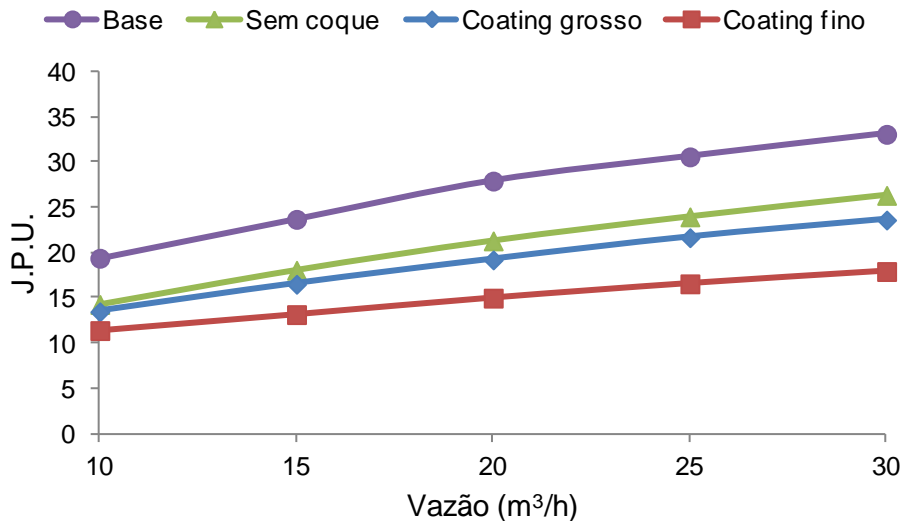


Figura 4. Permeabilidade do leito de quase-partículas ao final da aglomeração

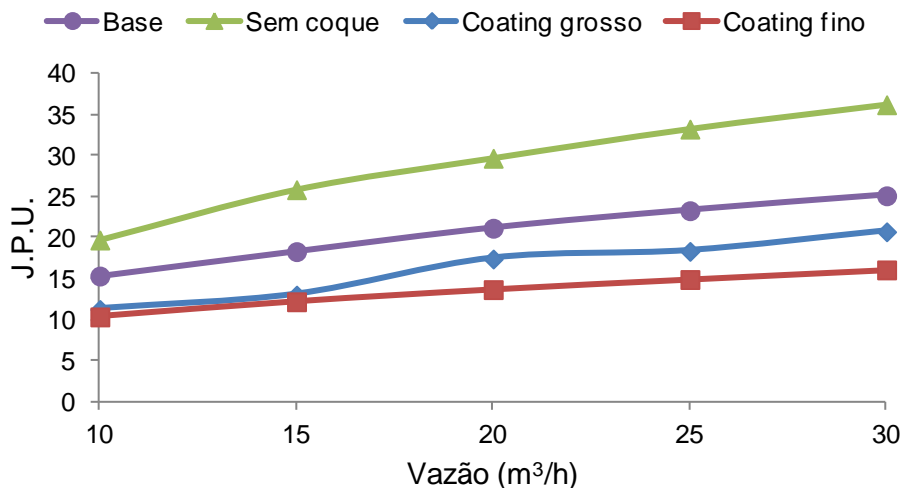


Figura 5. Permeabilidade do leito de quase-partículas após degradação

Avaliando a permeabilidade ao final da aglomeração, observa-se que a maior permeabilidade foi apresentada pela mistura base. Através das Figura 2 pode-se perceber que ela foi a mais homogênea, concentrando sua distribuição em uma granulometria intermediária e apresentando uma pequena porcentagem de finos menores que 0,5 mm. A que apresentou pior permeabilidade foi a mistura *coating* fino, e apesar de não ter a maior porcentagem abaixo de 0,5 mm, ela apresentou

elevada heterogeneidade, com sua distribuição variando ao longo de todas as granulometrias.

A permeabilidade após a queda de todas as misturas diminuiu, com exceção da mistura sem coque. Essa diminuição era esperada, uma vez que a porcentagem de granulometrias mais finas aumenta após a degradação, mostradas na Figura 2. A permeabilidade da aglomeração sem coque cresceu devido a uma equalização das granulometrias, provocada pela queda, aumentando a homogeneidade da mistura.

3 CONCLUSÃO

O efeito da adição de coque no processo de aglomeração a frio e no recobrimento foi estudado. Com isso, foi possível examinar o efeito do coque nas quase-partículas formadas, além de avaliar o processo de recobrimento presente no final da rota. Através desse trabalho pôde-se concluir que:

- (1) A adição de coque na etapa de aglomeração leva a uma diminuição do tamanho médio das quase-partículas produzidas, além de torná-las menos resistentes.
- (2) o processo de recobrimento é influenciado pela granulometria do coque, sendo favorecido por granulometrias finas;
- (3) o processo de recobrimento foi efetivo utilizando granulometria de coque aderente, entretanto essas partículas de coque se desprenderam no processo de queda;
- (4) o processo de recobrimento levou a uma diminuição na permeabilidade a frio da mistura.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 Castro LFA, Figueira RM, Tavares RP. Princípios básicos e processos de fabricação do gusa ao aço líquido; Belo Horizonte; 2004. Aglomeração de minérios de ferro: Sinterização; p. 36-48.
- 2 Lu L, Ishiyama O. Recent advances in iron ore sintering. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2016;125(3):132-139.
- 3 Niwa Y, Sakamoto N, Komatsu O, Noda H, Kumasaka A. Commercial production of iron ore agglomerates using sinter feeds containing a large amount of fine ores. *ISIJ International*. 1993;33(4):454-461.
- 4 Higuchi T, Iwami Y, Kuriki Y, Nushiro K, Sato M, Oyama N. Influence of Coke Breeze Positioning on the Sintering Behavior of Pellets and Raw Material Bed with Embedded Pellets. *ISIJ International*. 2013;53(9):1545-1554.
- 5 Arikata Y, Yamamoto K, Sassa, Y. Effect of coke breeze addition timing on sintering operation. *ISIJ International*. 2013;53(9):1523-1528.
- 6 Ogi H, Maeda T, Ohno KI, Kunitomo K. Effect of coke breeze distribution on coke combustion rate of the quasi-particle. *ISIJ International*. 2015;55(12):2550-2555.

- 7 Oyama N, Sato H, Takeda K, Ariyama T, Masumoto S, Jinno T, *et al.* Development of coating granulation process at commercial sintering plant for improving productivity and reducibility. *ISIJ International*. 2005;45(6):817-826.
- 8 González DF, Ruiz-Bustanza I, Mochón J, González-Gasca C, Verdeja LF. *Iron Ore Sintering: Raw Materials and Granulation, Mineral Processing and Extrative Metallurgy Review*. 2016
- 9 Furui T, Sugawara K, Kagawa M, Uno S, Kawazu M, Fujiwara T, *et al.* Technology for preparation of raw materials to be sintered. *Nippon Steel Technical Report*. 1977;(10):36-46.
- 10 Sato S, Yoshinaga M, Inchidate M, Kawaguchi T. Consideration on the granulation and the bed-permeability model of sinter raw materials. *Tetsu-to-Hagané*. 1982;68(15):2174-2181.