

AVALIAÇÃO DE INTERAÇÕES ENTRE QUEBRADORES E CLUSTERS EM FORNO DE REDUÇÃO DIRETA USANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

Fernando de Oliveira Boechat ¹
Rodrigo Magalhães de Carvalho ²
Luís Marcelo Marques Tavares ²

Resumo

As maiores pressões e temperaturas atualmente empregadas a fim de aumentar a produtividade de fornos de DRI têm resultado em um subproduto indesejado: o aumento da geração de clusters. Estes clusters prejudicam o fluxo da carga e a permeabilidade do leito. A fim de limitar o tamanho destes aglomerados o forno MIDREX dispõe de três conjuntos de quebradores localizados em diferentes posições do forno após a redução da carga. A interação entre clusters e esses quebradores, entretanto, pode também prejudicar o fluxo da carga e aumentar a geração de finos. O trabalho utilizou o método dos elementos discretos (DEM) para avaliar as energias e forças resultantes da interação entre os clusters formados e os quebradores. A descrição dos clusters foi realizada usando o *bonded-particle model*, disponível no software EDEM[®]. Simulações mostraram que a presença de clusters altera as forças e velocidades no entorno dos quebradores que tenderiam a aumentar a geração de finos no reator.

Palavras-chave: DEM; Quebradores; Cluster; Redução direta.

ASSESSING INTERACTIONS BETWEEN CLUSTERS AND BURDENFEEDERS IN A DIRECT REDUCTION FURNACE USING THE DISCRETE ELEMENT METHOD

Abstract

The higher pressures and temperatures currently used with the aim of increasing the productivity of DRI furnaces have resulted in an undesired byproduct: the increase in the generation of clusters. These clusters worsen the flow of the internal charge of the furnace and the permeability of the bed. In order to limit the size of these clusters, the MIDREX furnace has three sets of burdenfeeders, located in different positions inside the furnace after the region of load reduction. The presence of large clusters near these burdenfeeders affect negatively the flow of charge and can increase fines generation. The present work used the discrete element method (DEM) to estimate the energies and forces resulting from the interaction of these clusters and the burdenfeeders. The clusters structure was simulated using the bonded-particle model, available in EDEM[®] software. Simulations showed that the presence of clusters alters forces and velocities around burdenfeeders which would tend to increase the generation of fines in the reactor.

Keywords: DEM; Burdenfeeders; Cluster; Direct reduction.

I INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a produção de ferro esponja tem crescido no mundo e, entre os processos utilizados, o MIDREX tem tido maior destaque, sendo responsável por mais de 63%, aproximadamente 47,5 Mt, da produção mundial [1]. O forno utilizado é do tipo cuba, o qual trabalha

em contracorrente com os gases de redução. Ele pode ser dividido em três zonas: zona de redução, zona de transição e zona de resfriamento. Por ser um processo que utiliza o gás como agente redutor é importante que o fluxo dos gases seja uniforme. Alguns fatores podem interferir na homogeneidade

¹Centro Universitário Católico de Vitória – UCV, ES, Brasil. E-mail: fboechat@salesiano.br

²Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, RJ, Brasil.



do fluxo dos gases como, por exemplo, a presença de finos, a heterogeneidade da carga e a presença de clusters, também chamados em português de “cachos”. Este último tem se tornado, nos últimos anos um dos principais problemas para os produtores de ferro esponja. Segundo Wong et al. [2], o clustering é resultado das ligações criadas pelo crescimento de ferro fibroso na superfície do minério de ferro durante as etapas iniciais da metalização. O aumento da temperatura dos reatores nos últimos anos é apontado como sendo um dos principais fatores para uma maior geração de clusters nos fornos MIDREX.

Para diminuir a tendência à colagem na carga metálica, é realizada a aspersão de um agente de recobrimento óxido refratário na carga ferrífera antes do seu carregamento. No entanto, este recobrimento é superficial, e caso a carga não permaneça íntegra durante seu carregamento e redução, a formação de clusters será inevitável devido às regiões fragmentadas não terem este agente de recobrimento. Os clusters gerados na zona de redução irão seguir até a zona de transição e de resfriamento onde quebradores se encontram dispostos em três locais. Estes são projetados para oscilar varrendo ângulos pré-determinados com uma velocidade que é ajustada de forma a promover o movimento transversal uniforme da carga e limitar o tamanho dos aglomerados formados pela sua quebra. O primeiro conjunto de quebradores se localiza imediatamente abaixo do local de injeção do gás redutor na zona de transição, enquanto os dois últimos e localizam abaixo do ponto de injeção de gás de resfriamento (Figura 1).

A presença de clusters na região destes quebradores irá afetar o fluxo da carga e poderá ser necessário aumentar a velocidade dos quebradores que, por sua vez, seria responsável por uma maior quantidade de finos na descarga do forno. A simulação computacional se apresenta como uma ótima ferramenta para otimizar a operação e a configuração desses quebradores. Assim, o presente trabalho analisa, por meio da simulação utilizando o método dos elementos discretos (DEM), como a presença de clusters influencia tanto o fluxo da carga quanto as forças e energias atuantes nesta região.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização das simulações na região dos quebradores foi utilizado o software EDEM®, versão 2.6.2^a. O EDEM® demanda várias informações sobre as pelotas como densidade, módulo de cisalhamento, coeficiente de Poisson, coeficiente de atrito estático e de rolamento, e coeficiente de restituição. Os valores utilizados foram previamente obtidos em outro trabalho [3]. As pelotas de minério de ferro foram modeladas na forma de esferas. Os clusters foram criados empregando o *bonded-particle model*, ou seja, o modelo disponível no EDEM® que permite simular

agregados de partículas que podem ser fragmentados pela aplicação de esforços mecânicos. Entretanto, este modelo necessita de informações das energias de ligação entre as partículas. A fim de calibrar esses parâmetros do modelo foram comparados resultados de ensaios de tamboramento segundo a norma ISO 11256 [4] a resultados de simulações. Neste ensaio o cluster é submetido a 35 revoluções divididas em sete etapas. Nas simulações foi considerada apenas a primeira etapa, ou seja, apenas cinco revoluções (Figura 2). A simulação foi repetida, alterando os parâmetros de energia de ligação crítica até a seleção de um valor com o qual partes das pelotas permanecessem ligadas e partes se soltassem, pois esse foi o tipo de resultado obtido experimentalmente.

A partir dos parâmetros calibrados, foram criados clusters de dois tamanhos: um com tamanho pequeno o suficiente para passar facilmente pelo quebrador e outro com tamanho maior, de maneira que ficaria retido no quebrador (Figura 3).

A fim de minimizar o esforço computacional necessário para a realização das simulações, fez-se necessário adotar algumas premissas para construção do modelo de forma a diminuir o número de partículas envolvidas no processamento. Por exemplo, o esforço computacional foi tal que, para simular 5 segundos de operação da carga na região 5 (Figura 1), com aproximadamente 15.000 partículas, foram necessárias aproximadamente 6 horas de processamento em uma estação de trabalho Intel Xeon Quad X3370 @3.0 GHz com memória

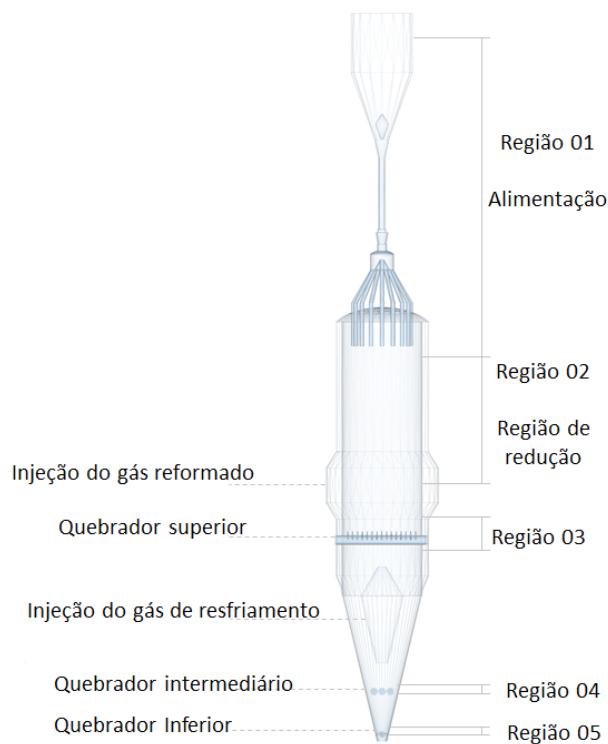


Figura 1. Lay-out de forno de redução do processo MIDREX®.

ª EDEM® é uma marca registrada da DEM Solutions Ltd. (Edinburgh, UK).

disponível de 4GB DDR 1333. De fato, as simulações foram conduzidas até que o estado estacionário fosse atingido. Primeiramente as simulações tomaram como base um forno de redução MIDREX do tipo Minimod® [5] com capacidade aproximada de 500.000 toneladas ano e cujas dimensões são proporcionais aos fornos de maior capacidade.

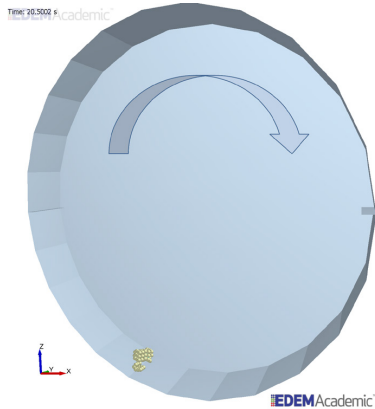


Figura 2. Simulação de ensaio de tamboramento de clusters segundo a norma ISO 11256 [4].

Foi escolhida a região do quebrador inferior para realização das simulações pois essa é a região com menor área, bem como pelo fato da carga já estar a uma temperatura mais próxima à ambiente. A frequência de giro e ângulo de rotação do quebrador inferior utilizado como base no estudo foram de 0,105 rad/s e 60°, respectivamente.

Outra premissa utilizada foi a de considerar os mesmos parâmetros de contato de DEM utilizados para a carga não reduzida [3]. É importante lembrar que a carga ferrífera perde resistência mecânica ao ser reduzida [6] e essa informação deve ser ponderada na interpretação dos resultados encontrados.

A partir dessas várias premissas foi criado o modelo da região do quebrador inferior, região 5, no EDEM® e foram inseridas as partículas (pelotas de minério de ferro) de forma a preencher toda a região do quebrador (Figura 4). As demais simulações foram realizadas a partir do reator preenchido com uma vazão aproximada de 16,5 kg/s (59 t/h) controlada por uma base virtual localizada abaixo das partículas. Foi mantida uma criação de partículas na parte superior a uma taxa de 20 kg/s (72 t/h). Foram realizadas simulações com e sem a inserção de clusters para efeito comparativo.

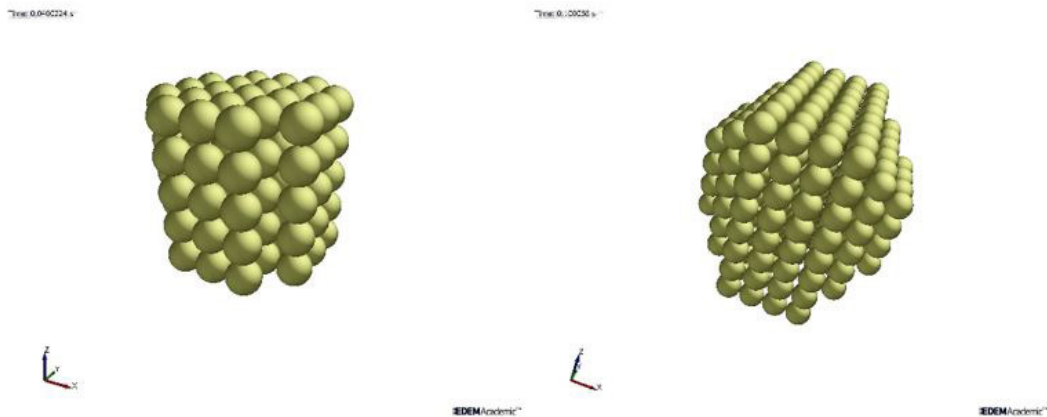


Figura 3. Formato dos clusters utilizados para simulações.



Figura 4. Região do quebrador inferior simulada com e sem partículas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta um resumo dos cenários simulados na região do quebrador inferior do forno MIDREX. A Simulação 01 refere-se àquela na qual o reator não possui clusters em seu interior e o quebrador apresenta velocidade de rotação constante. As forças compressivas são baixas e não apresentam valores capazes de fragmentar as pelotas, tomando como base a redução de 75% [6] na redução de uma pelota com 2800 N/pelota, ou seja, considerando valor para fragmentar as pelotas reduzidas superiores a 700 N (aproximadamente 70 kgf). Nas simulações 02 e 03 foram inseridos clusters de tamanho pequeno (capazes de passar pela menor abertura entre o quebrador e a parede do forno) e clusters grandes, respectivamente. Nestes dois casos percebe-se que algumas pelotas passam a sofrer a ação de forças compressivas superiores a 700 N. Na simulação 04, os clusters foram inseridos em apenas um dos lados do forno e mostraram forças compressivas médias altas, mas não superiores àquelas alcançadas nas simulações anteriores. A fim de avaliar a influência da operação do quebrador foi realizada a simulação 05, na qual foi aumentada a frequência de rotação do quebrador em 50%. Na prática, não foi observado nenhum aumento na força compressiva associado a essa alteração. Assim, mantendo a mesma velocidade do quebrador foram adicionados clusters (simulação 06) e, diferente da simulação 05, foi observada a maior média de força compressiva, com valores chegando a superar 1000 N. Apesar do aumento de velocidade não ter tido efeito significativo nas pelotas, o efeito combinado do aumento da taxa de alimentação e da velocidade do quebrador resultou em maiores valores de força compressiva na região do forno.

A Figura 5 apresenta a distribuição dos valores de força compressiva ao longo da região simulada. Pode-se verificar que entre as Figuras 5a e 5e não há diferença na distribuição das forças compressivas, mostrando que a velocidade do quebrador não altera significativamente as forças compressivas envolvidas. Os maiores valores obtidos nessas simulações foram encontrados próximo à saída do reator, provavelmente provocados pela redução do diâmetro nesta área. A diferença entre o lado esquerdo e o direito da seção é provocada pelo movimento do quebrador. Na Figura 5b, os pequenos clusters inseridos resultam no aumento da magnitude das

forças no seu entorno. Por outro lado, clusters de maiores dimensões, não somente são pontos de amplificação da força compressiva, mas também ocasionam distúrbio no fluxo, como evidenciado na Figura 5c, 5d e 5f. Inclusive, esta retenção resulta no aparecimento de uma região de baixas forças de compressão imediatamente abaixo destes clusters.

Apesar da velocidade do quebrador não ter efeito significativo na distribuição de forças compressivas na região estudada, quando se analisa a velocidade das pelotas no leito, vê-se que o quebrador passa a ter um efeito mais expressivo. Analisando a Figura 6a e 6c percebe-se que a velocidade padrão do quebrador mantém alguma uniformidade ao longo do eixo do forno. Entretanto quando aumentada em 50% a velocidade, percebe-se que o sentido do giro do quebrador causa um maior deslocamento das pelotas do lado esquerdo. A presença de clusters (Figuras 6b, 6c, 6d e 6f) também afeta o fluxo das pelotas e, por este motivo, podem retardar ou aumentar a velocidade das partículas. No caso de clusters que ainda não entraram na região de quebra (entre o quebrador e as paredes do forno neste caso), percebe-se que ocorre uma redução na velocidade das pelotas situadas imediatamente acima dos clusters. Por outro lado, quando os clusters entram na região de quebra e começam a fragmentar, eles deixam espaços vazios que logo são ocupados pelas pelotas posicionadas imediatamente acima deles, aumentando a sua velocidade nesta região. A Figura 6f mostra que o aumento da velocidade de giro do quebrador aliada à presença de um cluster aumenta a magnitude das velocidades nesta região do forno.

A Figura 7 apresenta a distribuição das energias de colisão no reator para as mesmas simulações apresentadas anteriormente, agora dando ênfase para as energias envolvidas. Para a condição considerada padrão (Figura 7a), percebe-se que as energias envolvidas nos choques são baixas e estão distribuídas de forma similar ao longo do eixo do forno. Comparando com a Figura 7e, a simulação na qual a velocidade de giro do quebrador foi elevada em 50%, percebe-se apenas um ligeiro aumento das energias de colisão sem que houvesse mudanças na sua distribuição. A inserção de clusters resultou em alteração no perfil das energias de colisão, sendo que a região onde estes se encontram apresentou maior magnitude das energias de colisão. A presença de clusters em apenas um lado do

Tabela 1. Resumo dos resultados dos diferentes cenários de simulação nas forças compressivas (N/pelota)

Simulação	Média	Máximo	Mediana	Desvio Padrão	% >50*	% >100**
01	12,5	178	8,5	13,0	2,0	0,05
02	15,2	742	9,2	20,3	4,6	0,5
03	15,6	924	9,0	23,2	5,1	0,8
04	15,7	1158	9,8	21,9	4,6	0,6
05	12,8	185	8,6	13,3	2,2	0,06
06	20,2	1364	11,3	30,0	9,4	1,6

*Porcentagem em massa de partículas sujeitas a força compressiva superior a 50 N/pelota. **Porcentagem em massa de partículas sujeitas a força compressiva superior a 100 N/pelota.

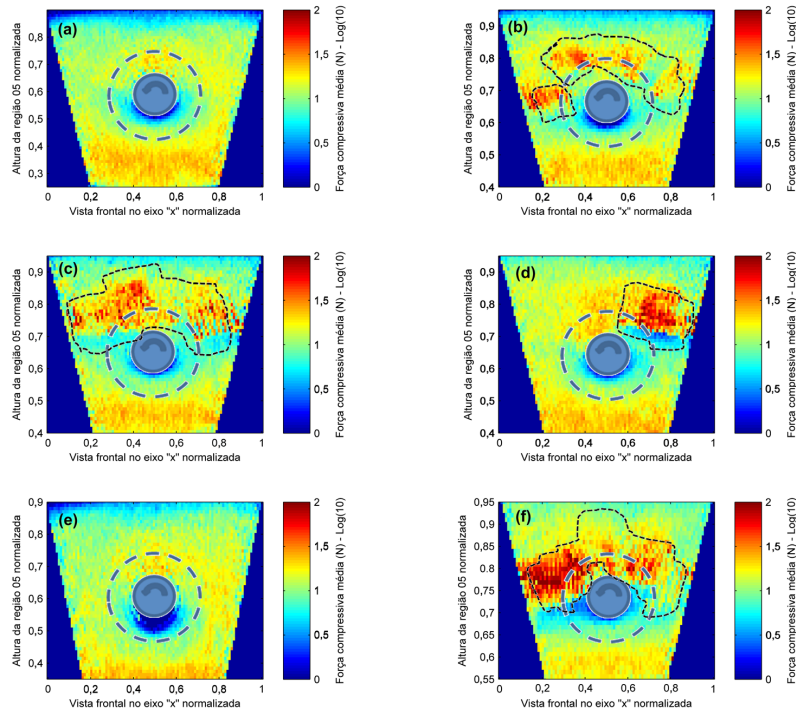


Figura 5. Força de compressão média: (a) fluxo de pelotas sem a presença de cluster (simulação 01) (b) fluxo de pelotas com presença de cluster de tamanho pequeno (simulação 02); (c) fluxo de pelotas com presença de cluster de tamanho grande (simulação 03); (d) fluxo de pelotas com presença de cluster em apenas um lado do reator (simulação 04); (e) fluxo de pelotas sem a presença de cluster com velocidade do quebrador aumentada em 50% (simulação 05) e (f) fluxo de pelotas com a presença de cluster com velocidade do quebrador aumentada em 50% (simulação 06). OBS: Região circular referente à posição do quebrador e região pontilhada preta referente à posição dos clusters no intervalo da análise.

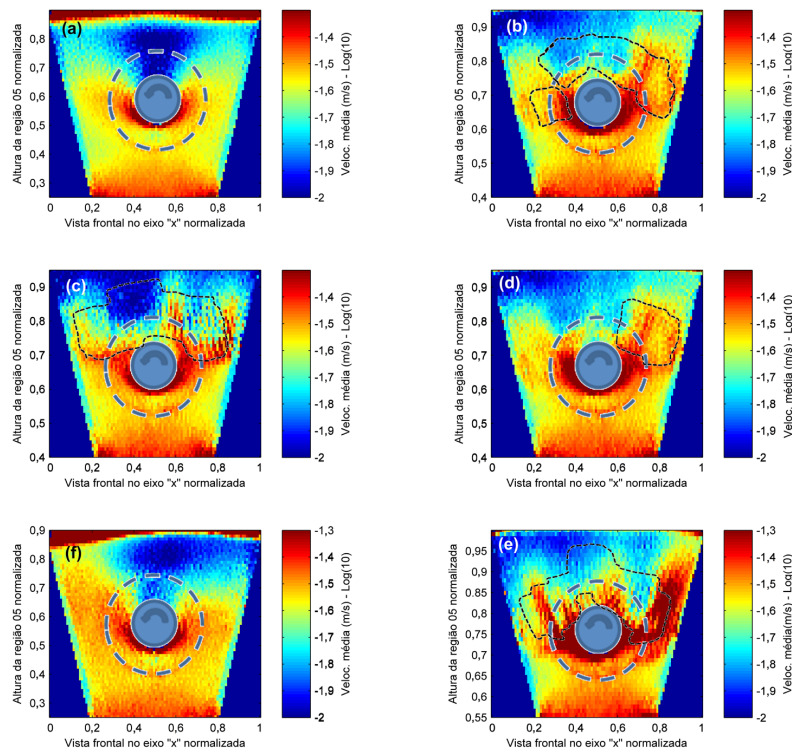


Figura 6. Velocidades médias das partículas: (a) fluxo de pelotas sem a presença de cluster (simulação 01); (b) fluxo de pelotas com presença de cluster de tamanho pequeno (simulação 02); (c) fluxo de pelotas com presença de cluster de tamanho grande (simulação 03); (d) fluxo de pelotas com presença de cluster em apenas um lado do reator (simulação 04); (e) fluxo de pelotas sem a presença de cluster com velocidade do quebrador aumentada em 50% (simulação 05) e (f) fluxo de pelotas com a presença de cluster com velocidade do quebrador aumentada em 50% (simulação 06). OBS: Região circular referente à posição do quebrador e região pontilhada preta referente à posição dos clusters no intervalo da análise.

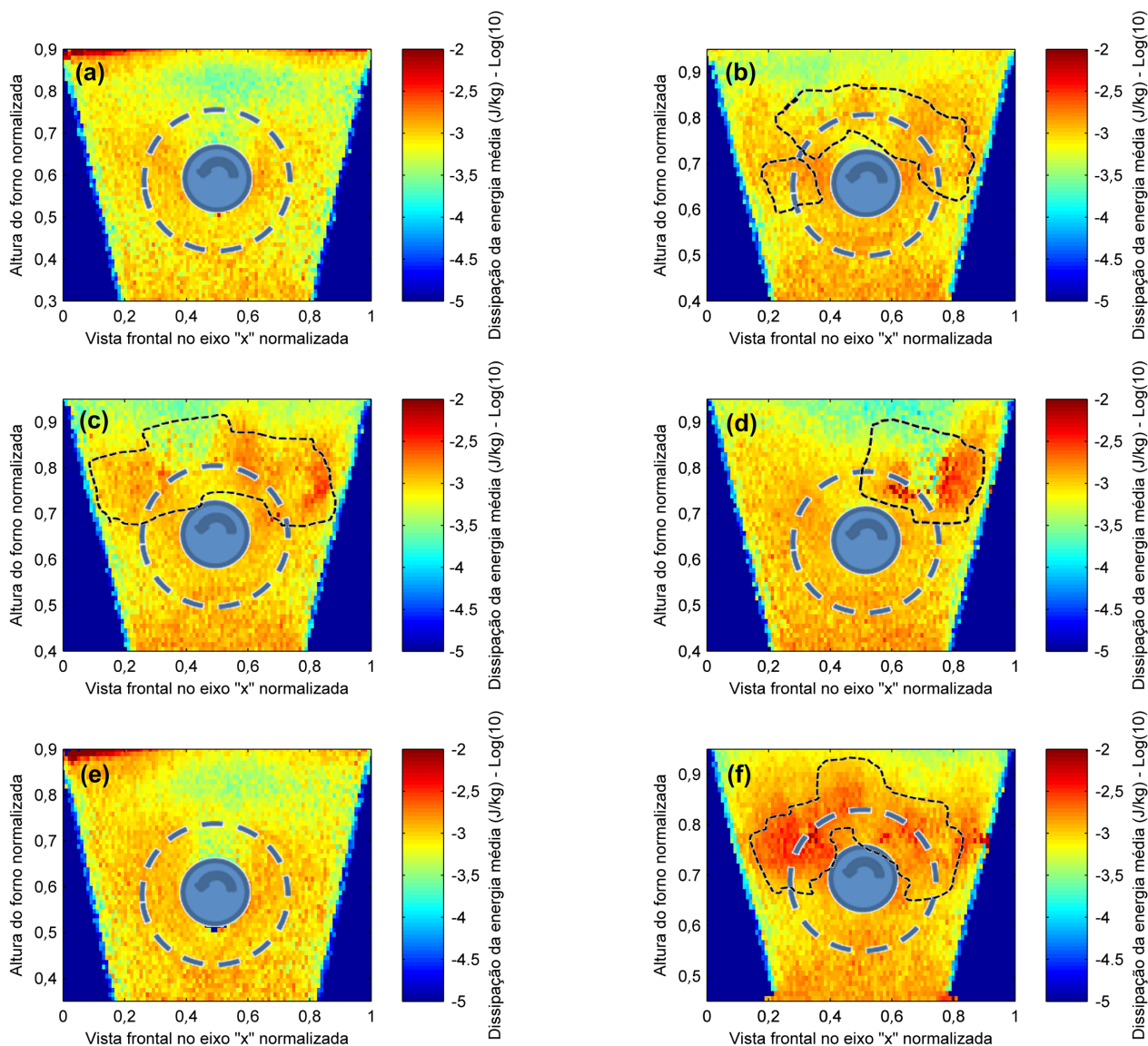


Figura 7. Magnitude e frequência da dissipação normal de energia de colisão: (a) fluxo de pelotas sem a presença de cluster (simulação 01); (b) fluxo de pelotas com presença de cluster de tamanho pequeno (simulação 02); (c) fluxo de pelotas com presença de cluster de tamanho grande (simulação 03); (d) fluxo de pelotas com presença de cluster em apenas um lado do reator (simulação 04); (e) fluxo de pelotas sem a presença de cluster com velocidade do quebrador aumentada em 50% (simulação 05) e (f) fluxo de pelotas com a presença de cluster com velocidade do quebrador aumentada em 50% (simulação 06).

reator (Figura 7d) mostra que, além das maiores energias de colisão na posição dos clusters, as energias de colisão do lado oposto também sofrem um ligeiro aumento. Mais uma vez a interação entre a velocidade do giro do quebrador aumentada em 50% e a presença de clusters (Figura 7f) mostrou ser mais impactante no aumento das energias de colisão envolvidas.

Entretanto na simulação do movimento da carga no interior do reator observou-se que as energias dissipadas se mostraram insuficientes para gerar degradação das pelotas. Isto pode ser concluído com base o trabalho de Tavares e Carvalho [7] no qual seria necessária uma energia

específica na ordem de 102 J/kg, além de se considerar que todas as pelotas alimentadas no forno foram íntegras. Por outro lado, calculando a proporção de finos gerados por estas energias, baseada no trabalho de Boechat e colaboradores [8], pode-se perceber que, mesmo sendo pequena, a geração de finos na região simulada tenderia a ter um aumento significativo, da ordem de 33%, na presença de clusters (Figura 8). Considerando, além da presença de cluster, o aumento da velocidade de giro do quebrador, a Figura 9 mostra que a geração de finos tende a mostrar-se maior, apresentando um valor mais significativo na produção do reator.

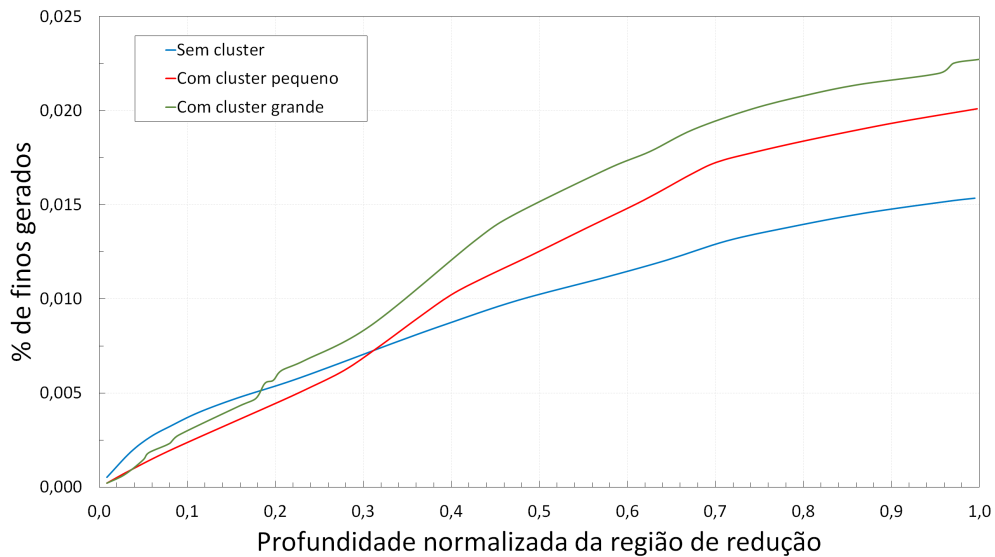


Figura 8. Evolução da geração de finos em relação à profundidade do forno na região do quebrador inferior (região 5).

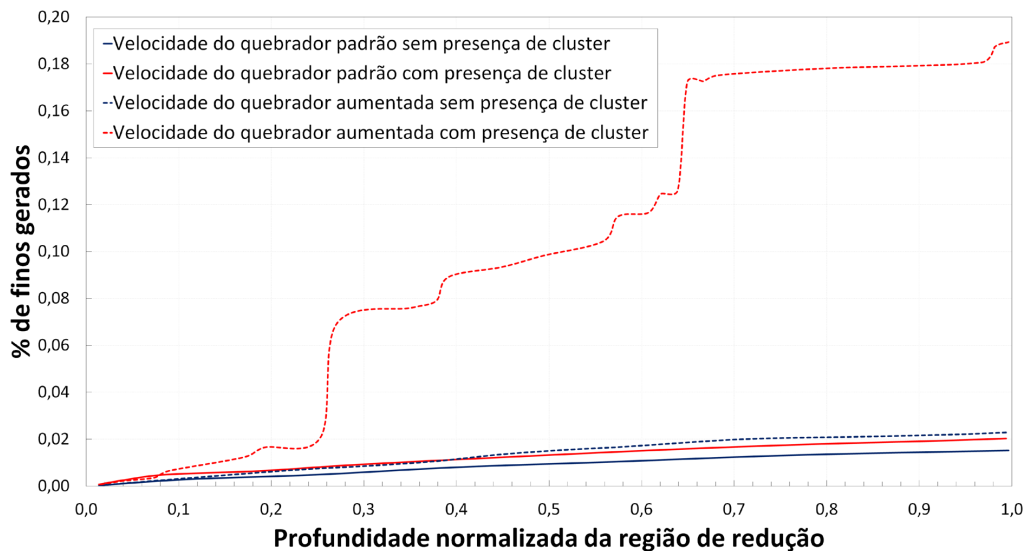


Figura 9. Comparação da evolução da geração de finos em relação à profundidade do forno na região simulada com o aumento da velocidade do quebrador.

4 CONCLUSÕES

Na ausência de clusters na região do quebrador inferior no forno de redução MIDREX as forças e energias de colisão provocadas pelo movimento dos quebradores seriam insuficientes para fragmentar pelotas. A presença de clusters, independentemente de seu tamanho é responsável pelo aumento da força compressiva e da velocidade das pelotas em sua região.

A frequência de giro do quebrador, dentro dos níveis estudados, não afetou diretamente a magnitude das forças compressivas na região do quebrador inferior na ausência

de clusters. Entretanto, esse aumento da frequência de giro do quebrador aumentou tanto a magnitude das forças compressivas quanto a das velocidades das pelotas em sua região, na presença de clusters. Apesar de que a presença dos clusters ter aumentado a energia média das colisões das pelotas, não é possível afirmar que elas seriam suficientes para fragmentá-las, por ser necessário usar valores comparativos de pelotas integras e sem a perda de resistência proveniente de sua redução. Entretanto é possível perceber uma tendência de geração de finos quando há presença de cluster na região dos quebradores.

A presença de clusters e a variação da velocidade de giro do quebrador foram responsáveis pela criação de distúrbios no fluxo de material no interior do reator, podendo afetar negativamente a sua capacidade de produção além de mostrarem uma tendência maior da geração de finos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Vale S.A. pelo financiamento da pesquisa e pela autorização da sua publicação, enquanto L.M. Tavares e R.M. de Carvalho agradecem ao CNPq e à CAPES pelas bolsas de apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 Midrex Technologies Inc. World direct reduction statistics. North Carolina: Midrex; 2013.
- 2 Wong PLM, Kim MJ, Kim HS, Choi CH. Sticking behaviour in direct reduction of iron ore. *Ironmaking & Steelmaking*. 1999;26(1):53-57.
- 3 Barrios GKP, Carvalho RM, Kwade AW, Tavares LM. Contact parameter estimation for dem simulation of iron ore pellet handling. *Powder Technology*. 2013;248:84-93.
- 4 International Organization for Standardization. ISO 11256. Geneva: ISO; 1998.
- 5 Atsushi M, Uemera H, Sakaguchi T. Midrex process. *Kobelco Technology Review*. 2010;29:50-57.
- 6 Huang Z, Yi L, Jiang T. Mechanisms of strength decrease in the initial reduction of iron ore oxide pellets. *Powder Technology*. 2012;221:284-291.
- 7 Tavares LM, Carvalho RM. Modeling ore degradation during handling using continuum damage mechanics. *International Journal of Mineral Processing*. 2011;101(1-4):21-27.
- 8 Boechat FO, Carvalho RM, Baltazar AWS, Tavares LM. Simulação da degradação mecânica de pelotas de minério de ferro em forno de redução direta. In: *Anais do 44º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas & 15º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro*; 2014 Set 15-18; Belo Horizonte. Diadema: Inbras; 2014. p. 1-13.

Submetido em: 27 Out., 2016

Aceito em: 9 Fev., 2017