

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA REDUÇÃO DIRETA DE MINÉRIO DE FERRO EM FORNOS MIDREX

A. C. Silva¹, A. T. Bernardes²

¹Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Goiás
Av. Dr. Lamartine Pinto de Avelar, 112, Catalão, GO, 75704-020. e-mail: andre@iceb.ufop.br

²Departamento de Física, Universidade Federal de Ouro Preto
Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, 35400-000. e-mail: atb@iceb.ufop.br

RESUMO

Usando a técnica de modelamento computacional denominada autômatos celulares foi possível simular a geração e a descarga de uma pilha de pelotas de minério de ferro dentro de um forno de redução direta, assim como calcular o grau de redução das pelotas quando estas deixavam o forno. Isto permitiu simular a variação de parâmetros operacionais e verificar os resultados destas variações no grau de redução das pelotas. Os dados simulados foram validados em duas instâncias: para a dinâmica do fluxo das pelotas no forno foi usado um silo de acrílico bidimensional e para a validação dos dados da redução direta das pelotas foram usados dados da literatura. Os resultados simulados foram considerados aceitáveis para descrever o movimento das pelotas de minério de ferro dentro do forno de redução direta (resultados estes que podem ser aplicados para o movimento de grãos em silos, que em suma é o mesmo problema) e para descrever a redução direta das pelotas de minério de ferro no forno.

PALAVRAS-CHAVE: simulação; pirometalurgia; modelamento; minério de ferro.

1. INTRODUÇÃO

Existem atualmente dois processos usados industrialmente para a produção de ferro metálico, classificados como redução direta e indireta. A redução indireta é mais antiga e considerada mais agressiva ambientalmente que a direta. Na redução direta faz-se uso de gás natural, num forno, em contracorrente com pelotas de minério de ferro para a redução destas. O processo MIDREX é o mais importante processo de fabricação de ferro reduzido diretamente (DRI), responsável por cerca de dois terços da produção mundial de DRI. No processo MIDREX o reator principal é do tipo leito móvel, onde as pelotas de minério de ferro se movem em contracorrente com o gás natural, sendo assim reduzidas e produzindo o DRI.

Os autômatos celulares são modelos computacionais onde o tempo e o espaço são ambos discretizados e a evolução do sistema obedece a regras específicas pré-determinadas. Esses modelos permitem estudar sistemas de grande tamanho em tempo e custo computacionais aceitáveis (Wolfram, 2002). Segundo Rucker (2005) tudo que existe tem por base algoritmos simples capazes de gerar a complexidade observada no universo.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um simulador computacional usando a técnica denominada autômato celular que permitisse testar modificações nas variáveis de processo de um forno MIDREX. É possível variar parâmetros tais como alimentação do forno, sua geometria, temperatura de chama e de exaustão e tamanho das pelotas visando simular o grau de redução das pelotas de minério de ferro ao deixarem o forno.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do simulador foi dividido em três etapas: a formação de pacotes granulares dentro de um silo, o descarregamento de grãos através de um orifício na base do silo e a redução das pelotas de minério de ferro em ferro metálico.

2.1. Modelamento Da Montagem De Um Pacote Granular

Para simular a formação de pacotes granulares porosos em duas dimensões utilizou-se uma malha cujo sítio era menor que os objetos simulados, diferentemente do usualmente praticado na simulação por autômatos celulares, sendo o tempo e o espaço discretizados. Desta forma um objeto simulado ocupa vários sítios, com o seu centro de massa sempre coincidindo com um sítio. O algoritmo usado para a geração do pacote granular proposto consiste em:

11. Sortear uma posição horizontal aleatória para o centro de massa da pelota, sendo a posição vertical igual ao topo da caixa;
12. Soltar a pelota do topo da caixa (queda livre);
13. Caso não exista nenhuma pelota abaixo da pelota cadente esta atingirá a base da caixa e não mais se moverá (choque totalmente inelástico entre a pelota e a caixa);
14. Caso existam outras pelotas em rota de colisão com a pelota cadente é verificado:
 - a. Se as pelotas estacionárias podem se mover para acomodar a pelota

- cadente (vide figura 1a);
- b. Move-se a pelota cadente lateralmente de modo a contornar as pelotas estacionárias (vide figura 1b);
 - c. Retorna-se ao passo 2 até a pelota cadente atingir a base da caixa.
15. Retorna-se ao passo 1 até o número de pelotas a serem inseridas na caixa tenha sido atingido.

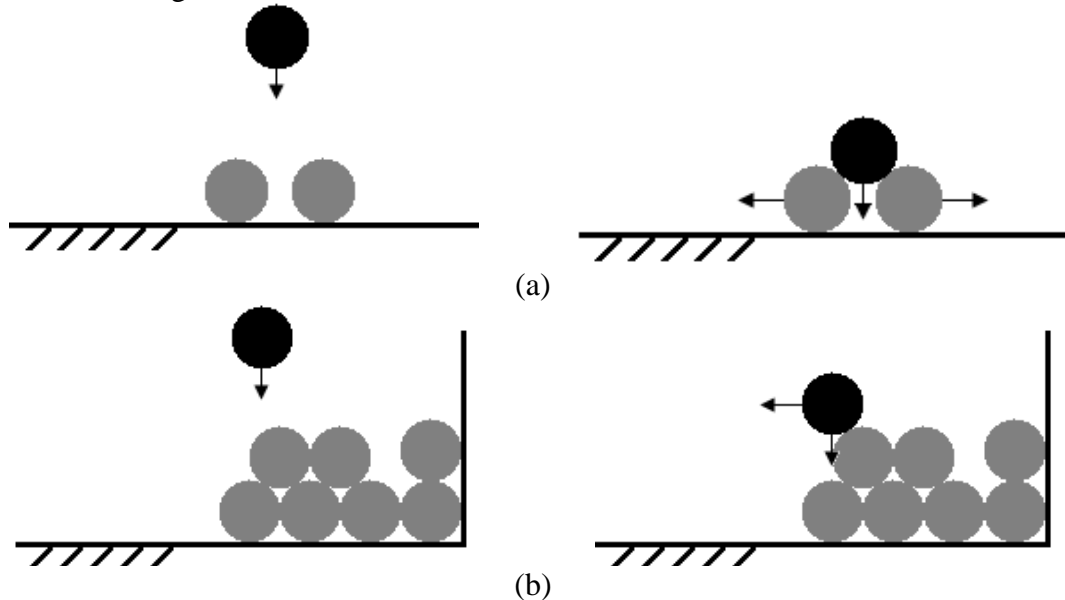


Figura 1 – Detalhe do algoritmo de formação de pilhas granulares mostrando o tratamento de colisões.

A figura 2 apresenta quatro pacotes granulares gerados dentro de um silo com altura de 746 pixels, largura de 250 pixels, ângulo do orifício de descarga de 60° e tamanho do orifício de descarga de 125 pixels: o primeiro com 100 discos de 40 pixels de diâmetro cada (figura 2a), o segundo com 400 discos de 20 pixels de diâmetro cada (figura 2b), o terceiro com 1.700 discos de 10 pixels de diâmetro cada (figura 2c) e o quarto com 11.000 discos de 4 pixels de diâmetro cada (figura 2d).

2.2. Modelamento Da Descarga De Um Silo

O modelo proposto inicialmente foi então ampliado, de modo que as pelotas que se situarem imediatamente acima do orifício de descarga do silo fossem removidas do silo numa mesma iteração. Após a remoção de uma ou mais pelotas a posição de todas as demais deve ser atualizada, de modo que o pacote granular se torne estável novamente. O passo anterior pode ser entendido como o fechamento do orifício de descarga, sendo o processo de descarga simulado como um processo em batelada. Para manter o número de pelotas constante dentro da caixa novas pelotas eram inseridas no topo da caixa após a estabilização do pacote.

Para validar o modelo proposto foi construído um aparato experimental composto de duas placas de acrílico transparente, formando um silo bidimensional de placas planas, semelhante ao proposto por Yang e Hsiau (2001). A designação de bidimensional se deve ao fato do material colocado no interior do silo formar uma monocamada de grãos dentro deste. Como material a ser usado no silo foram cortados

discos de acrílico com diâmetro nominal de 2 e 4cm e espessura de 0,2cm. A figura 3 apresenta duas fotos do silo carregado: com 100 discos de acrílico de 4cm de diâmetro e inclinação do orifício de descarga de 60° (figura 3a) e com 300 discos de acrílico de 2cm de diâmetro e inclinação do orifício de descarga de 45° (figura 3b). As dimensões adotadas para o silo mostrado na figura 2 retratam as dimensões do silo usado na validação experimental dos dados gerados pela simulação, equiparando um pixel da simulação a um milímetro do experimento.

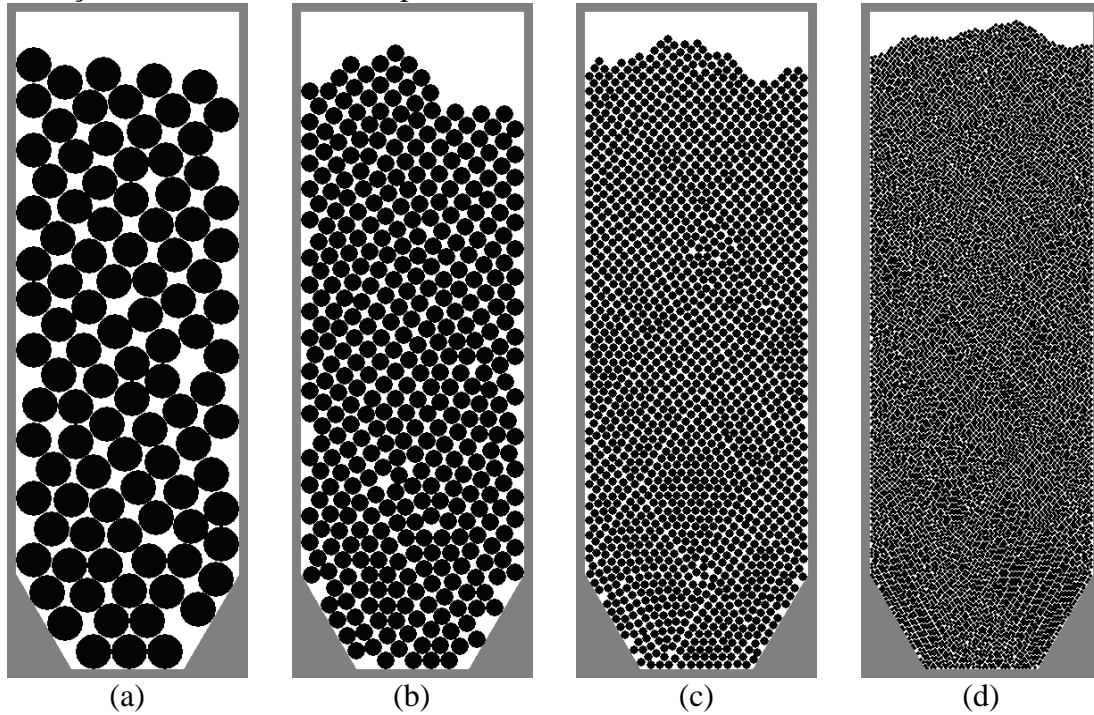


Figura 2 – Quatro pacotes granulares gerados pelo modelo proposto.

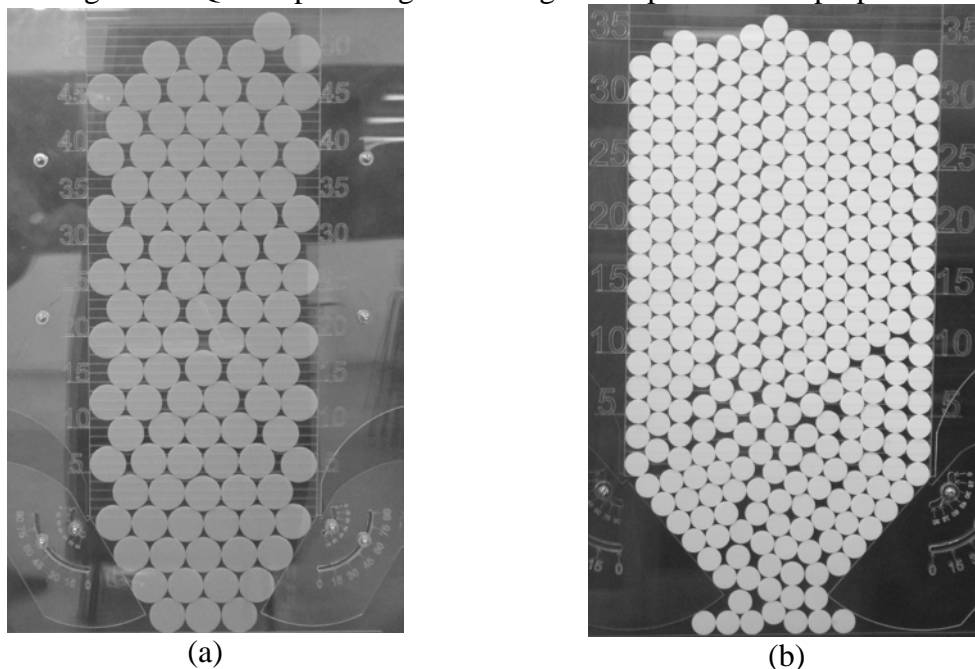


Figura 3 – Silo bidimensional carregado: (a) com 100 discos de acrílico de 4cm de diâmetro, 0,2cm de espessura e ângulo do orifício de descarga de 60° e (b) com 300 discos de acrílico de 2cm de diâmetro, 0,2cm de espessura e ângulo do orifício de descarga de 45° .

2.3. Modelamento Da Redução Direta De Pelotas De Minério De Ferro

A última adição ao modelo consistiu na inserção de gás redutor a uma dada altura do forno, gerando em seu interior um gradiente de temperatura vertical. A cada iteração incrementa-se o tempo de exposição ao gás redutor das pelotas localizadas em uma faixa de temperatura acima da qual as reações químicas de redução ocorrem (chamada zona quente). Contudo, não basta apenas que a pelota esteja numa zona quente para que esta seja reduzida. Para modelar a probabilidade de redução da pelota foi utilizada a técnica de Monte Carlo, sendo criado um parâmetro denominado probabilidade de redução da pelota. Para cada pelota situada na zona quente sorteia-se um número aleatório e, caso este número seja menor que a probabilidade de redução definida, o tempo de residência da pelota no forno é incrementado. Segundo Paco (2005) o grau de redução das pelotas de minério de ferro (R) em um processo de fluxo contínuo é dado por:

$$R = B(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1)$$

Onde B é o coeficiente de saturação da redução, isto é, o nível máximo de redução quando a curva se torna assintótica, τ é o parâmetro da escala temporal, relacionado à taxa de reação no início da redução, e t o tempo de reação. No modelo proposto o tempo de exposição da pelota ao gás redutor (t) foi substituído pelo tempo de residência da pelota no forno.

3. RESULTADOS

Foram realizados ensaios no silo bidimensional com três inclinações diferentes do orifício de descarga ($\theta = 45, 60$ e 75°) para os discos de acrílico de 2cm de diâmetro (φ) e com duas inclinações ($\theta = 60$ e 75°) para os discos de acrílico com $\varphi = 4$ cm, sendo que para $\theta = 0^\circ$ o orifício se encontra fechado e para $\theta = 90^\circ$ o silo se encontra totalmente aberto (sem orifício). As simulações foram realizadas para as mesmas condições descritas para o experimento, sendo os resultados obtidos são mostrados nas figuras 4 e 5.

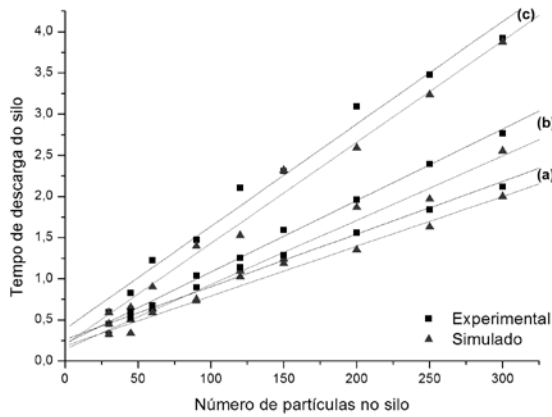


Figura 4 – Resultados para os testes com discos de $\varphi = 2\text{cm}$ e $\theta = 45^\circ$ (a), 60° (b) e 75° (c).

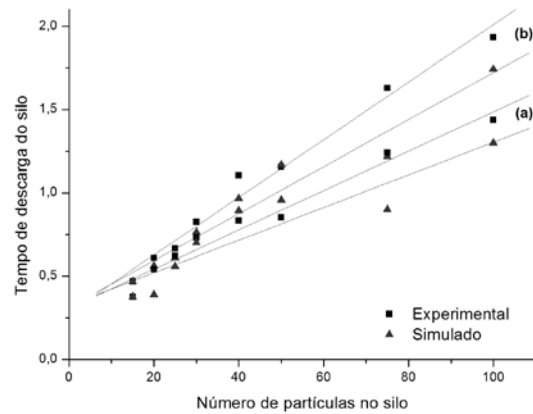


Figura 5 – Resultados para os testes com discos de $\varphi = 4\text{cm}$ e $\theta = 60^\circ$ (a) e 75° (b).

O ajuste encontrado experimentalmente que descreve o descarregamento do silo de acrílico para qualquer inclinação e tamanho de disco é dado por:

$$t = c_1 \cdot (c_4 \cdot M \cdot \cos(\theta))^2 + (c_2 + Np)c_4 \cdot M \cdot \cos(\theta) + c_3 \quad (2)$$

Onde t é o tempo de descarregamento do silo, c_1 , c_2 , c_3 e c_4 são constantes dependentes do material (6009,2; -101,22; 0,6268; 0,02724 respectivamente), Np é o número de discos no silo e M é a massa média dos discos.

Foram realizados quatro ensaios a fim de verificar o modelamento proposto, sendo que os dados experimentais utilizados foram extraídos do trabalho de Paco (2005). Os resultados encontrados são apresentados na figura 6. O primeiro ensaio (figura 6a) foi realizado com temperatura do forno (T) de 900°C , pressão total do gás (P) de $1,2\text{atm}$ e potencial redutor do gás (que é definido pela relação CO/CO_2 na composição do gás) de $0,85$. O segundo ensaio (figura 6b) possui parâmetros operacionais semelhantes ao primeiro ensaio, divergindo apenas na pressão total do gás (de $1,2$ para $2,5\text{atm}$). No terceiro ensaio (figura 6c) considerou-se uma mistura do gás do topo do forno com gás novo, $T = 500^\circ\text{C}$, $P = 2,5\text{atm}$ e potencial redutor do gás de $0,58$. Para o quarto ensaio realizado (figura 6d) as variáveis operacionais usadas foram $T = 500^\circ\text{C}$, $P = 2,5\text{atm}$, potencial redutor do gás de $0,58$. Para todos os ensaios a vazão do gás (V) era constante e igual a $60\text{NL}/\text{min}$.

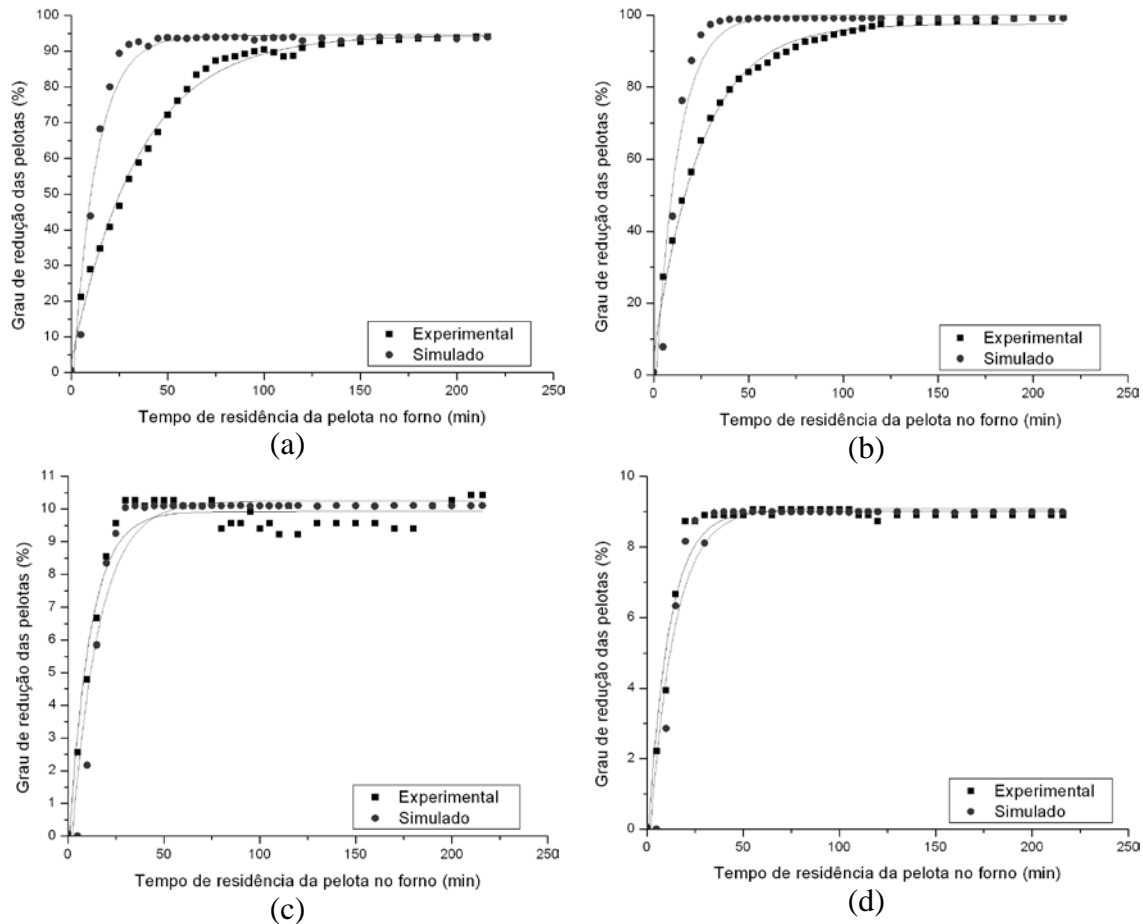


Figura 6 – Resultados: (a) $T = 900^{\circ}\text{C}$, $P = 1,2\text{atm}$; (b) $T = 900^{\circ}\text{C}$, $P = 2,5\text{atm}$; (c) $T = 500^{\circ}\text{C}$, $P = 2,5\text{atm}$ e (d) $T = 500^{\circ}\text{C}$, $P = 2,5\text{atm}$.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

É notório que em diversos sistemas granulares a taxa de escoamento dos grãos permanece constante durante o seu escoamento, não dependendo da altura da pilha. Desta forma, foi adotado como aceitável a hipótese de uma relação linear entre a quantidade de discos dentro do silo experimental e o tempo necessário para a sua descarga. Como mostrado na figura 4 o processo de descarregamento de um silo, quando se compara a quantidade de partículas presentes no silo em relação ao tempo de descarregamento, apresenta uma forte correlação linear. O melhor ajuste entre os dados experimentais e a regressão linear obteve uma adesão de 99,87% (discos com $\varphi = 2\text{cm}$ e $\theta = 60^{\circ}$, figura 4b) e o pior ajuste obteve uma adesão de 98,45% (discos com $\varphi = 4\text{cm}$ e $\theta = 75^{\circ}$, figura 5b). O melhor ajuste entre os dados simulados e a regressão linear obteve uma adesão de 99,43% (discos com $\varphi = 2\text{cm}$ e $\theta = 45^{\circ}$, figura 4a) e o pior ajuste obteve uma adesão de 91,74% (discos com $\varphi = 4\text{cm}$ e $\theta = 60^{\circ}$, figura 5a). Apesar das retas obtidas experimentalmente e simulada não serem coincidentes, estas tem comportamento semelhante.

Os resultados obtidos para a redução de pelotas de minério foram comparados com dados gerados em um ensaio tridimensional tanto de descarga do forno quanto de redução das pelotas. Os resultados obtidos se mostraram satisfatórios, uma vez que as

curvas obtidas experimentalmente se assemelham às curvas obtidas pela simulação para os quatro experimentos simulados indicando que a simulação realizada em duas dimensões forneceu resultados condizentes com o experimento em três dimensões. Nota-se, nas figuras 7a e 7b, que o modelo proposto prevê um grau de redução inicial das pelotas acima do observado experimentalmente, contudo o patamar do grau de redução se mostrou compatível em ambos os casos.

Outro ponto a ser considerado é a adesão da equação (1) aos dados da redução direta, uma vez que os ajustes realizados obtiveram adesões superiores a 90% tanto para os dados experimentais quanto para os dados simulados.

5. CONCLUSÕES

A técnica dos autômatos celulares, como esperado, se mostrou versátil e ágil, requerendo baixo custo computacional. Através desta técnica foi possível simular a dinâmica de geração de pilhas de meios granulares bastando para tal criar regras de atualização compatíveis com o fenômeno em estudo. Contudo, as regras implementadas no presente trabalho diferem das regras clássicas propostas para os autômatos celulares, uma vez que a regra proposta de atualização da posição de uma pelota não depende exclusivamente dos sítios vizinhos. A posição que uma não ocupará depende também da posição e da possibilidade de movimentação das pelotas vizinhas (uma pelota pode “empurrar” lateralmente uma pelota que esteja situada diretamente abaixo desta). Esta modificação na técnica foi fundamental para o sucesso das simulações realizadas.

Mais apenas que uma inovação na forma do uso dos autômatos celulares o presente trabalho confirma as hipóteses do uso desta ferramenta na simulação de materiais granulares. Nenhum ajuste foi feito no modelo proposto de modo a se adequar aos dados experimentais, pelo contrário, os dados produzidos pelo modelo foram apenas comparados aos experimentais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Paco, L. J. M. Cinética da redução de pelotas de minério de ferro em condições simuladas de um reator MIDREX. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: PUC, 2005.

Rucker, R. *The Lifebox, the Seashell, and the Soul: What gnarly computation taught me about ultimate reality, the meaning of life, and how to be happy*. New York, Avalon Publishing Group, 2005. 506 p.

Yang, S. C., Hsiau, S. S. The simulation and experimental study of granular materials discharged from a silo with the placement of inserts. *Powder Technology*, 120:3, p. 244–255, 2001.

Wolfram, S. *A New Kind Of Science*. Wolfram Media, 2002. 1192 p.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento deste projeto, à Rede Temática em Engenharia de Materiais (Redemat) e à Universidade federal de Ouro Preto (UFOP).