

# **SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO ESCOAMENTO DE GRÃOS EM SILOS**

A. C. Silva<sup>1</sup>, E. M. S. Silva<sup>2</sup>, S. O. Freitas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento 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](mailto:andre@iceb.ufop.br)

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Goiás  
Av. Dr. Lamartine Pinto de Avelar, 112, Catalão, GO, 75704-020. e-mail: [eschons@yahoo.com](mailto:eschons@yahoo.com)

<sup>3</sup>Aluna do curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Goiás  
Av. Dr. Lamartine Pinto de Avelar, 112, Catalão, GO, 75704-020. e-mail: [sula.oliveira@yahoo.com.br](mailto:sula.oliveira@yahoo.com.br)

## **RESUMO**

Todo e qualquer material requer um procedimento adequado para a sua estocagem e/ou armazenamento. Não diferentemente os materiais granulares, tais como minérios, cereais e cimento requerem uma estrutura adequada para mantê-los. Os silos são estruturas utilizadas em várias áreas com a finalidade de armazenar grãos. Diversos autores vêm se dedicando a simular o comportamento de materiais granulares em silos, sejam eles bi ou tridimensionais, bem como sua posterior descarga por gravidade através de um ou mais orifícios presentes no silo. Para este fim, diferentes técnicas de simulação computacional têm sido aplicadas. O presente trabalho visa apresentar o desenvolvimento de um simulador, que usando a técnica denominada autômato celular é capaz tanto de gerar um pacote granular em um silo bidimensional como o seu posterior descarregamento, reproduzindo o escoamento do material granular pelo orifício de descarga do silo (tremonha). Os parâmetros geométricos do silo podem ser configurados neste simulador, bem como parâmetros físicos dos grãos a serem armazenados. Foram realizados ensaios experimentais com discos de 2 e 4cm de diâmetro e 0,2cm de espessura em acrílico em um silo bidimensional também de acrílico. Para a realização dos ensaios em três dimensões foi construída uma estrutura em madeira para a sustentação de garrafas PET de diversos volumes, usadas como silo devido à sua geometria peculiar. Nos ensaios tridimensionais foram usadas amostras bitoladas de areia de quartzo da região de Catalão-GO. Os resultados encontrados mostram uma forte correlação entre as análises experimentais e o simulador desenvolvido.

**PALAVRAS-CHAVE:** simulação; pacotes granulares; escoamento granular; silos.

## 1. INTRODUÇÃO

Todo e qualquer material requer um procedimento adequado para a sua estocagem e/ou armazenamento. Materiais granulares são usualmente estocados em silos. Os silos são estruturas de armazenamento de grãos reconhecidamente importantes nas mais diversas áreas, tais como a agricultura, mineração, indústria cimenteira, dentre outras.

Vários autores têm se dedicado a simular computacionalmente o problema da geração de um pacote granular denso em um silo (seja ele bi ou tridimensional) e sua posterior descarga por um orifício. Para isso inúmeras técnicas de simulação computacional têm sido testadas. Pode-se, contudo, destacar alguns trabalhos de reconhecida importância tais como Langston et al. (1995) que utilizaram um modelo computacional baseado em elementos discretos (DE) para simular o fluxo de material granular armazenado em um silo por uma tremonha. Outros autores tais como Allen e Tildesley (1987) e Rapaport (2004) usaram modelos baseados em dinâmica molecular (MD) de partículas elásticas. Já Lubachevsky (1991) e Herrmann e Luding (1998) utilizaram o simulação conduzida por eventos (EDS) para partículas rígidas.

A metodologia para a simulação da descarga de silos usadas no presente trabalho é a denominada autômato celular (CA). Tal técnica é uma poderosa ferramenta usada para descrever, entender e simular o comportamento de sistemas físicos complexos, nos quais existe uma dificuldade razoavelmente grande em se utilizar as abordagens convencionais, baseadas em equações diferenciais. Quando se trabalha com autômatos celulares o comportamento do objeto simulado não é descrito em termos de equações diferenciais, mas sim em sistemas discretos. A maior desvantagem desta técnica de simulação reside no fato de que os modelos gerados são puramente cinéticos, não considerando a dinâmica dos fluidos, ou no caso deste trabalho, do meio granular. Kozicki e Tejchman (2005) usaram CA para a simulação de padrões de descarga de silos adotando em seu trabalho quatro regras simples para o autômato que, segundo os autores, consegue descrever de forma aceitável os dois tipos de descarga comumente observados em silos: descarga mássica e descarga em funil. Contudo, o modelo desenvolvido pelos autores não é capaz de simular um empacotamento granular poroso.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Modelamento Bidimensional Da Descarga De Silos

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:

6. Sortear uma posição horizontal aleatória para o centro de massa do disco, sendo a posição vertical igual ao topo da caixa;
7. Soltar o disco do topo da caixa (queda livre);
8. Caso não exista nenhuma disco abaixo do disco cadente este atingirá a base da caixa e não mais se moverá (choque totalmente inelástico entre o disco e a

- caixa);
9. Caso existam outros discos em rota de colisão com o disco cadente verifica-se:
    - a. Se os discos estacionários podem se mover para acomodar o disco cadente (vide figura 1a);
    - b. Move-se o disco cadente lateralmente, de modo a contornar os discos estacionários (vide figura 1b);
    - c. Retorna-se ao passo 2 até o disco cadente atingir a base da caixa.
  10. Retorna-se ao passo 1 até que o número de discos a serem inseridos na caixa tenha sido atingido.

O modelo foi então ampliado, de modo que os discos que se situarem imediatamente acima do orifício de descarga do silo fossem removidos do silo numa mesma iteração. Após a remoção de um ou mais discos a posição de todos os 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 discos constante dentro da caixa novas discos eram inseridos no topo da caixa após a estabilização do pacote.

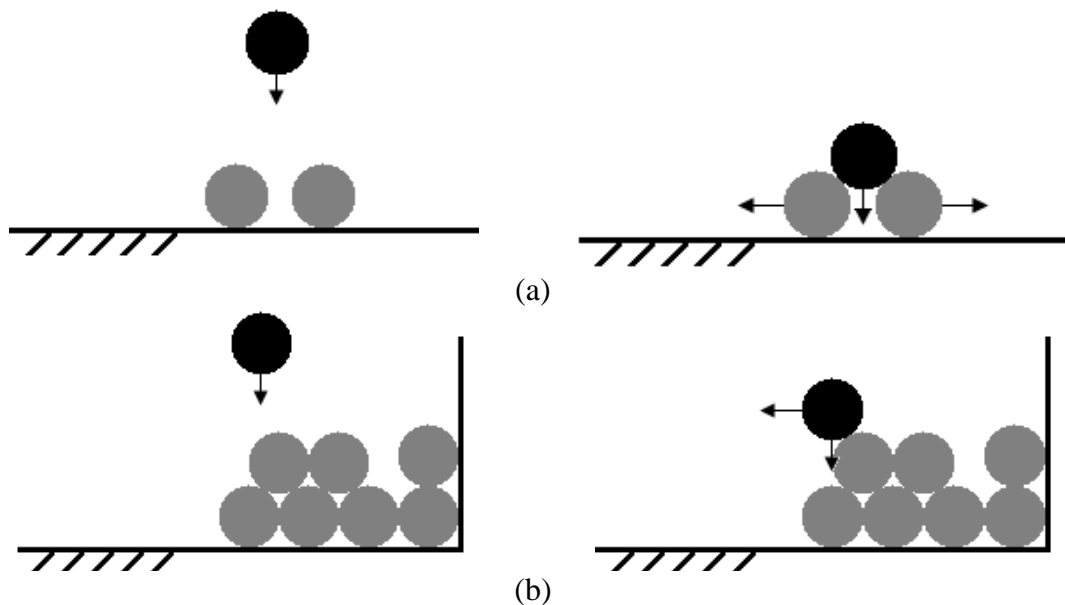


Figura 1 – Detalhe do algoritmo de formação de pilhas granulares mostrando o tratamento de colisões.

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  $60^\circ$  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).

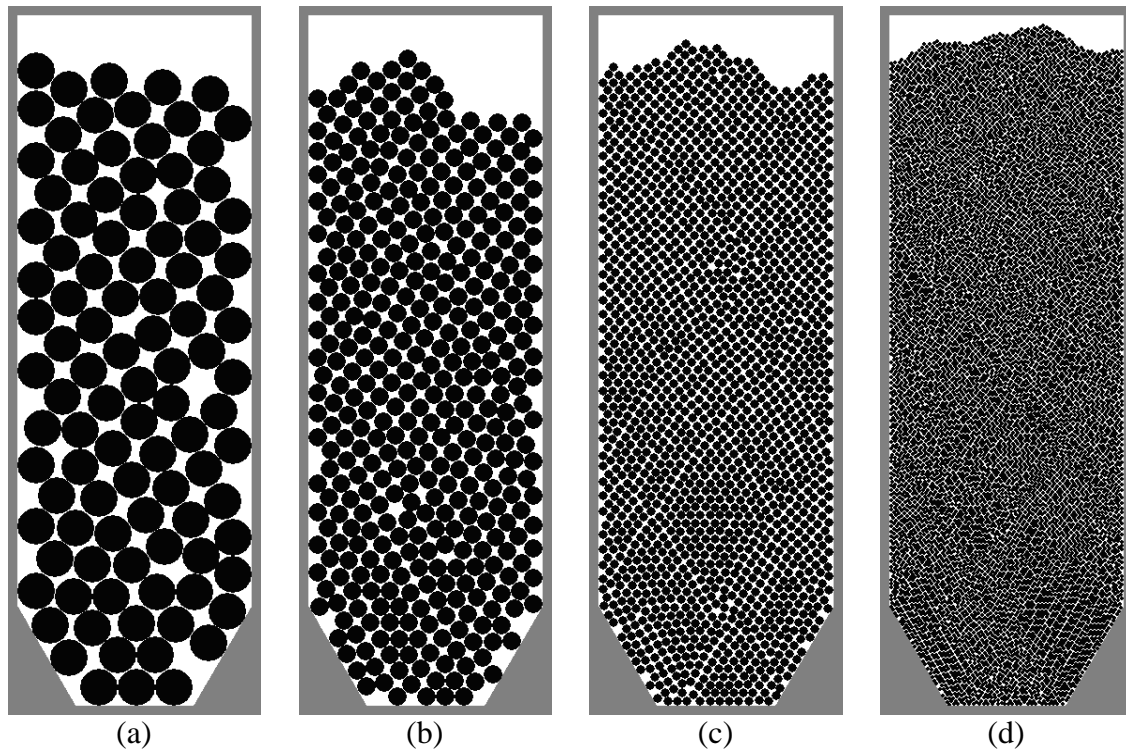


Figura 2 – Quatro pacotes granulares gerados pelo modelo proposto.

## 2.2. Silo Bidimensional de placas planas em acrílico

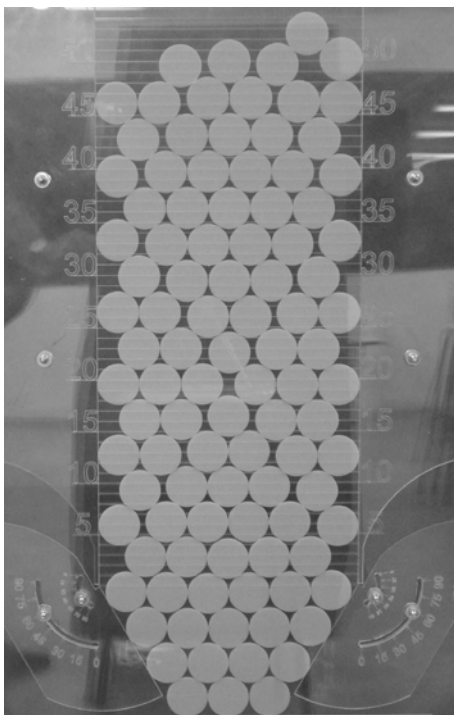
De modo a confrontar e mesmo validar os dados gerados pela simulação computacional foi construído um aparato experimental composto para placas de acrílico transparentes, sendo assim um silo bidimensional de placas planas. A designação de bidimensional se deve ao fato do material colocado no interior do silo formar uma monocamada de grãos dentro deste. Desta forma, o silo proposto permite o estudo da movimentação das partículas sendo descarregadas, não sendo considerado o atrito relativo entre duas camadas de material ou mesmo entre o material e o silo.

Para a montagem do silo foram cortadas duas placas de acrílico transparente de 155 x 45 x 0,5 cm (largura x comprimento x espessura), para serem usadas como a parte frontal e traseira do silo. Para compor a lateral do silo foram usadas duas peças do mesmo acrílico com 90 x 10 x 0,3 cm. Em tais peças foi cortado um encaixe circular para que a inclinação da tremonha do silo pudesse ser regulada de 0 a 90°, encaixando-se nas peças laterais sem gerar nenhuma abertura na lateral do silo. Ainda para compor o fechamento do entre as partes do silo duas peças de 10 x 10 x 0,3 cm foram instaladas na base do silo. Para junção das peças de acrílico utilizou-se parafusos de 0,5 cm com arruelas e porcas. Como as peças instaladas entre as placas frontal e traseira do silo tinham espessura de 0,3 cm a espessura interna no silo era de 0,3 cm. Para dar sustentação vertical do silo e manter o seu ponto de descarga afastado do chão foram coladas nas peças de acrílico frontal e traseira duas peças trapezoidais, apoiadas sobre uma placa de 45 x 25 x 0,5 cm. Para que fosse possível a movimentação da tremonha dentro do silo foram feitos rasgos em semicírculos na placa frontal e traseira e na placa da tremonha. Assim sendo, o silo desenvolvido permite a regular o ângulo da tremonha. Contudo, o tamanho do bocal de descarga do silo varia de acordo com a inclinação da

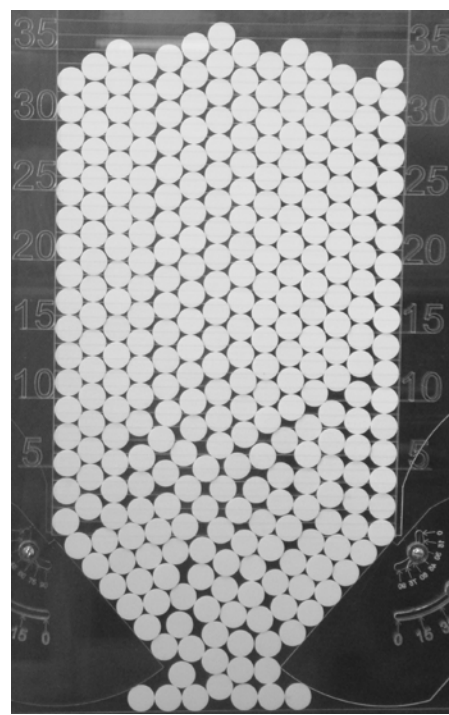
tremonha, uma vez que a peça em acrílico desenvolvida para atuar como tremonha possui um comprimento de 12,5 cm para dentro do silo. Deste modo, quando as placas da tremonha são montadas em um ângulo de  $0^\circ$  o silo fica completamente fechado e quando a tremonha é regulada para um ângulo de  $90^\circ$  o silo fica completamente aberto. A espessura da placa da tremonha era compatível com as demais partes internas do silo e igual a 0,3 cm.

De modo a facilitar a configuração da inclinação da tremonha foi gravada uma escala em ambos os rasgos, variando de 0 a  $90^\circ$ . Nas peças frontais foi gravada uma escala linear com precisão de 1 cm para a verificação da altura de material dentro do silo. Todos os cortes, perfurações e/ou gravações realizadas nas placas de acrílico foram feitas usando um laser CNC tendo como modelo de entrada o modelo do silo feito em AutoCAD.

Como material a ser usado no silo foram cortados discos de acrílico com diâmetro nominal de 2 e 4 cm e espessura de 0,2 cm. A figura 1 apresenta duas fotos do silo carregado, a primeira com 100 discos de acrílico de 4 cm de diâmetro e inclinação da tremonha de  $60^\circ$  (figura 3a). A segunda foto (figura 3b) apresenta o silo carregado com 300 discos de acrílico de 2 cm de diâmetro e inclinação da tremonha de  $45^\circ$ . Os testes realizados com o silo consistiam em mensurar o tempo de descarregamento deste em função da quantidade de discos nele colocados e da inclinação da tremonha. Para a mensuração correta e precisa do tempo de descarga do silo utilizou-se uma câmera digital Cyber-Shot DSC-50H fabricada pela empresa Sony para realizar a filmagem em resolução Full HD (resolução 1080p) da descarga dos discos. Após a filmagem o vídeo gerado era editado e a sua duração mensurada utilizando-se o software livre VirtualDub 1.8.8 compilação 30091 desenvolvido por Avery Lee. A câmera digital Cyber-Shot DSC-50H é capaz de gerar vídeos em trinta quadros por segundos (30 fps), gerando assim um quadro do objeto filmado a cada trinta e três milissegundos, sendo esta a precisão obtida com a medição do tempo de descarga do silo.



(a)



(b)

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. Silo Tridimensional de Garrafas PET

A fim de analisar o escoamento de grãos tridimensionalmente foi construída uma estrutura em madeira para atuar como suporte para garrafas PET's de diversos tamanhos, a serem usadas como silos. Para a realização dos ensaios foram usadas garrafas PET do refrigerante Fanta de 1,5l e amostras bitoladas de areia de quartzo. A figura 4 apresenta a análise granulométrica da areia usada nos ensaios.

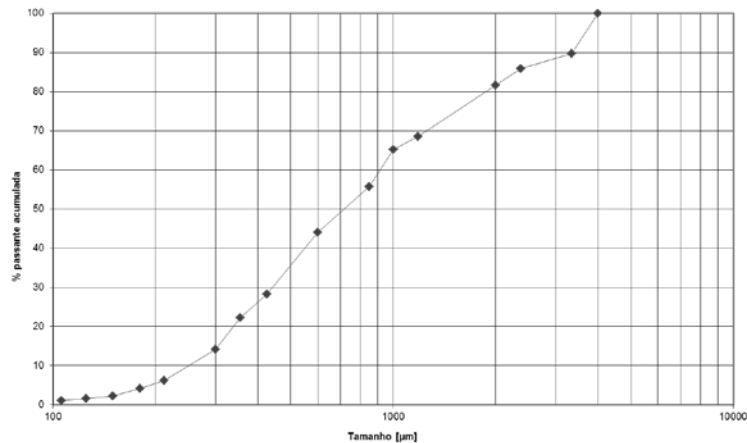


Figura 4 – Análise granulométrica da areia usada nos ensaios com o silo tridimensional.

## 3. RESULTADOS

Foram realizados ensaios no silo bidimensional com três inclinações diferentes do orifício de descarga ( $\theta = 45, 60$  e  $75^\circ$ ) para os discos de acrílico de 2cm de diâmetro ( $\varphi$ ) e com duas inclinações ( $\theta = 60$  e  $75^\circ$ ) 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 5 e 6.

Com o silo tridimensional foram realizados ensaios variando-se a massa de areia no silo bem como a granulometria da areia. Os resultados encontrados são exibidos na figura 7.

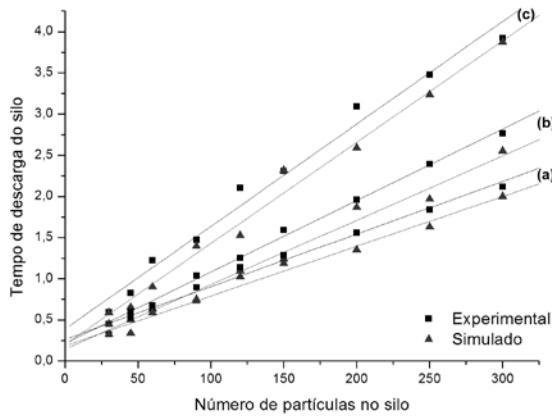


Figura 5 – Resultados para os ensaios com discos de  $\varphi = 2\text{cm}$  e  $\theta = 45^\circ$  (a),  $60^\circ$  (b) e  $75^\circ$  (c).

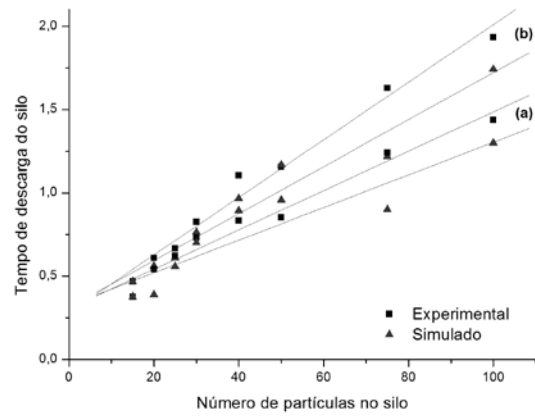


Figura 6 – Resultados para os ensaios com discos de  $\varphi = 4\text{cm}$  e  $\theta = 60^\circ$  (a) e  $75^\circ$  (b).

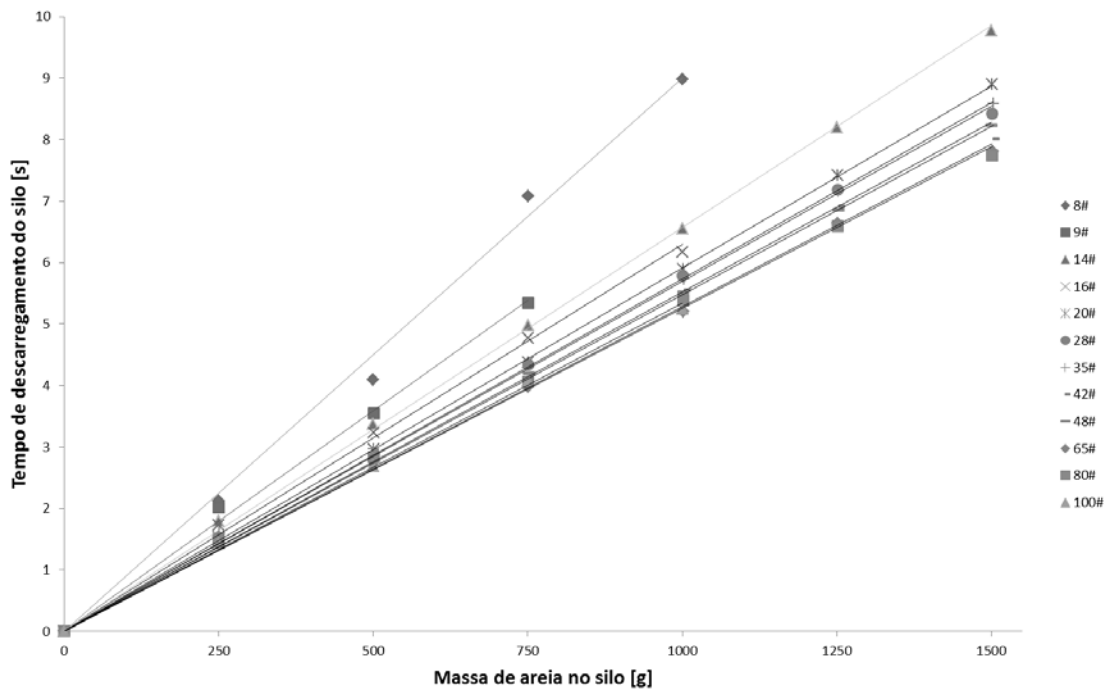


Figura 7 – Resultados para os ensaios com o silo tridimensional e várias granulometrias de areia de quartzo.

#### 4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

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 ensaios com o silo tridimensional mostraram uma forte correlação linear entre o tempo de descarregamento do silo e a quantidade de material em seu interior. A tabela I apresenta o coeficiente angular ( $a$ ) resultado dos ajustes lineares feitos para cada granulometria de areia usada. Em cada ajuste o valor do coeficiente linear ( $b$ ) foi igual à zero. O tempo de descarregamento do silo tridimensional carregado com areia pode então ser modelado, com um ajuste de 95,38%, pela seguinte equação:

$$t = 0,0051.m.e^{0,0002x}$$

Onde  $m$  é a massa de areia no silo,  $x$  o tamanho da peneira que reteve a areia.

Tabela I – Resultados dos ajustes lineares para os ensaios com areia de quartzo no silo 3D.

$\mu m$	2368	2000	1184	1000	850	600	425	355	300	212	180	150
#	8	9	14	16	20	28	35	42	48	65	80	100
$a$	0,009	0,0072	0,0066	0,0063	0,0059	0,0057	0,0057	0,0055	0,0055	0,0053	0,0053	0,0053
$R^2$	0,9946	0,9965	0,9995	0,9979	0,9998	0,9994	0,9993	0,9972	0,9989	0,9983	0,9976	0,9984

## 5. CONCLUSÕES

Como esperado a descarga de um material granular em um silo apresenta uma correlação linear entre a quantidade de material presente no silo e o seu tempo de descarregamento. Os ensaios em duas e três dimensões corroboram esta afirmativa. A técnica de simulação computacional usada para modelar o descarregamento de grãos em silos se mostrou eficiente para o descarregamento em duas dimensões. Espera-se, com o desenvolvimento de um simulador em três dimensões, simular o descarregamento de qualquer material granular (tal como a areia) com precisão aceitável. Ensaios adicionais ainda serão realizados tanto com areia quanto com outros minerais de diferentes formas de grãos e massas específicas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen M. P., Tildesley, D. J. Computer Simulation of Liquids. New York: Oxford University Press, 1987. 408 p.

Duran, J., Mazozi, T., Luding, S., Clément, E., Rajchenbach, J. Discontinuous decompaction of a falling sandpile. Physical Review E, v. 53, n. 2, p. 1923–1930, 1996.

Herrmann, H. J., Luding, S. Modeling granular media on the computer. Continuum Mechanics and Thermodynamics, v. 10, n. 4, p. 189–231, 1998.

Langston, P. A., Tuzun, U., Heye, D. M. Discrete element simulation of granular flow in 2d and 3d hoppers: dependence of discharge rate and wall stress on particle interactions. Chemical Engineering Science, v. 50, n. 6, p. 967–987, 1995.

Rapaport, D. C. The Art of Molecular Dynamics Simulation. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 564 p.