

ANÁLISE DIGITAL DA POROSIDADE DE PACOTES GRANULARES

A. C. Silva¹, E. M. S. Silva², F. K. da Silva³, E. A. Silva⁴, G. C. S. Silva⁵, R. A. de Souza⁶

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 Engenharia de Minas, Universidade Federal de Goiás
Av. Dr. Lamartine Pinto de Avelar, 112, Catalão, GO, 75704-020. e-mail: eschons@yahoo.com.br

³ Departamento de Matemática, Universidade Federal de Goiás
Av. Dr. Lamartine Pinto de Avelar, 112, Catalão, GO, 75704-020. e-mail: kennedy.fernando@gmail.com

⁴ Departamento de Matemática, Universidade Federal de Goiás
Av. Dr. Lamartine Pinto de Avelar, 112, Catalão, GO, 75704-020. e-mail: elida.alves@ig.com.br

⁵ Aluna do curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Goiás
Av. Dr. Lamartine Pinto de Avelar, 112, Catalão, GO, 75704-020. e-mail: gabrielacsilva@gmail.com

⁶ Aluno do curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Goiás
Av. Dr. Lam. Pinto de Avelar, 112, Catalão, GO, 75704-020. e-mail: rafaelalvarengadesouza@gmail.com

RESUMO

A porosidade é um termo referente aos espaços vazios de uma determinada matéria. Em muitas situações a medida da porcentagem de poros é fundamental para uma melhor avaliação da realidade. Seu estudo é extremamente importante, por exemplo, quando se trata de petróleo já que, para existir um reservatório, é necessária a existência de uma rocha suficientemente porosa e permeável para armazenar este fluido, além disso, tal rocha precisa estar confinada por rochas não porosas e impermeáveis, evitando o escape do petróleo. O presente trabalho visa o desenvolvimento de um simulador capaz de gerar pacotes granulares densos, mas ainda porosos. Para a validação do simulador desenvolvido foram realizados ensaios experimentais com discos de 2 e 4cm de diâmetro e 0,2cm de espessura em acrílico com inclinações da tremonha de descarga do silo de 45, 60 e 75°. Após a montagem do pacote granular no silo este era fotografado em uma câmara digital de alta resolução. As imagens eram posteriormente tratadas e a porosidade do pacote granular medida diretamente pela análise das imagens digitais. Os resultados encontrados nos ensaios experimentais com o silo bidimensional mostram uma forte correlação com os resultados obtidos pelo simulador desenvolvido.

PALAVRAS-CHAVE: simulação; modelamento; análise de imagem; porosidade.

1. INTRODUÇÃO

A porosidade de um pacote granular refere-se ao volume de espaços vazios em relação ao volume total do pacote. Em muitas situações a medição da porosidade é fundamental para uma melhor avaliação da realidade. Seu estudo é extremamente importante, por exemplo, quando se trata de petróleo. Para que exista um reservatório deste bem mineral é necessária a existência de uma rocha portadora de petróleo, porosa e permeável para armazená-lo, comumente o arenito. A rocha portadora precisa estar confinada por rochas encaixantes não porosas e impermeáveis, evitando assim o escape do petróleo. Antonelli e Pollard (1994) determinaram uma classificação dos arenitos utilizando a porosidade e a classificação dos grãos através de experimentos numéricos usando o método de elementos distintos.

O estudo da porosidade de pacotes granulares se faz importante também devido à grande movimentação de materiais granulares necessária na mineração. Esse estudo faz-se necessário tanto nas atividades de lavra quanto no processamento mineral. Operações como o transporte dos materiais granulares os expõem a vibrações. Segundo Bobryakov (1997) tais vibrações provocam alterações na posição relativa dos grãos, modificando assim a porosidade do pacote, uma vez que esta não é constante.

Pilhas de minério e depósitos de estéril quando feitos a céu aberto ficam expostos à percolação de águas pluviais, sendo esta dependente da porosidade do pacote granular. Willingham et al. (2008) estudaram como a geometria e as dimensões dos poros de um pacote granular podem influir nas reações químicas originadas pela percolação de água através do pacote.

Vários autores têm se dedicado a simular computacionalmente o problema da geração de pacotes granulares. 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 a simulação conduzida por eventos (EDS) para partículas rígidas.

O presente trabalho apresenta um modelo destinado a gerar pacotes granulares, bem como a medição de sua porosidade através da análise de imagens digitais. Para validar o modelo proposto foram gerados pacotes granulares em um aparato experimental de baixo custo, um silo bidimensional de placas planas de acrílico. Os resultados encontrados indicam uma forte correlação entre os dados experimentais e o modelo proposto.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

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:

1. Sortear uma posição horizontal aleatória para o centro de massa da pelota, sendo a posição vertical igual ao topo da caixa;
2. Soltar a pelota do topo da caixa (queda livre);
3. 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);
4. 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.
5. Retorna-se ao passo 1 até o número de pelotas a serem inseridas na caixa tenha sido atingido.

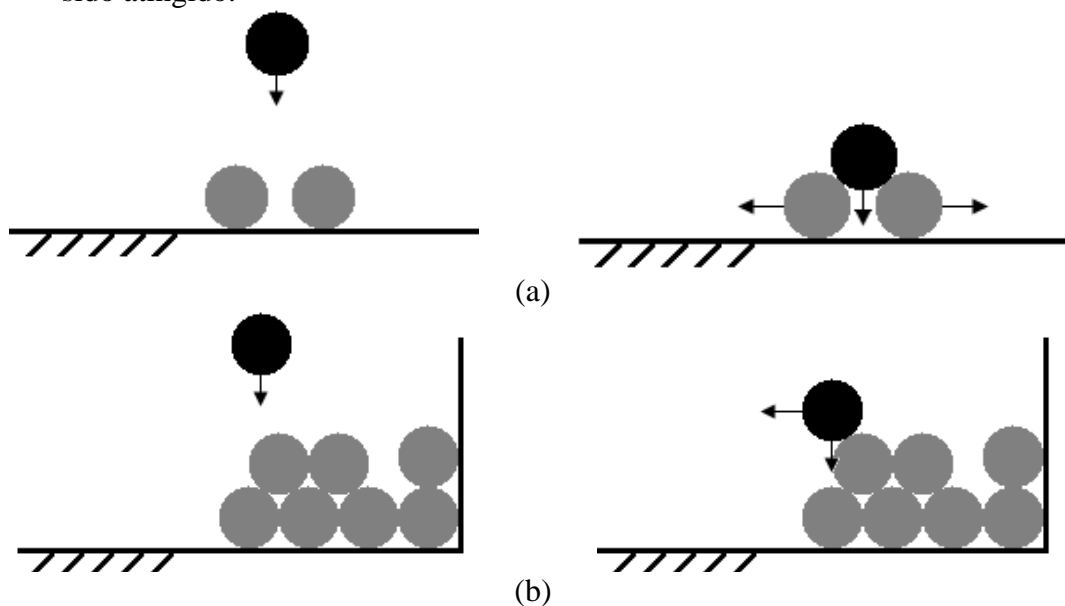


Figura 1 – Detalhe do algoritmo de formação de pilhas granulares mostrando o tratamento de colisões.

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).

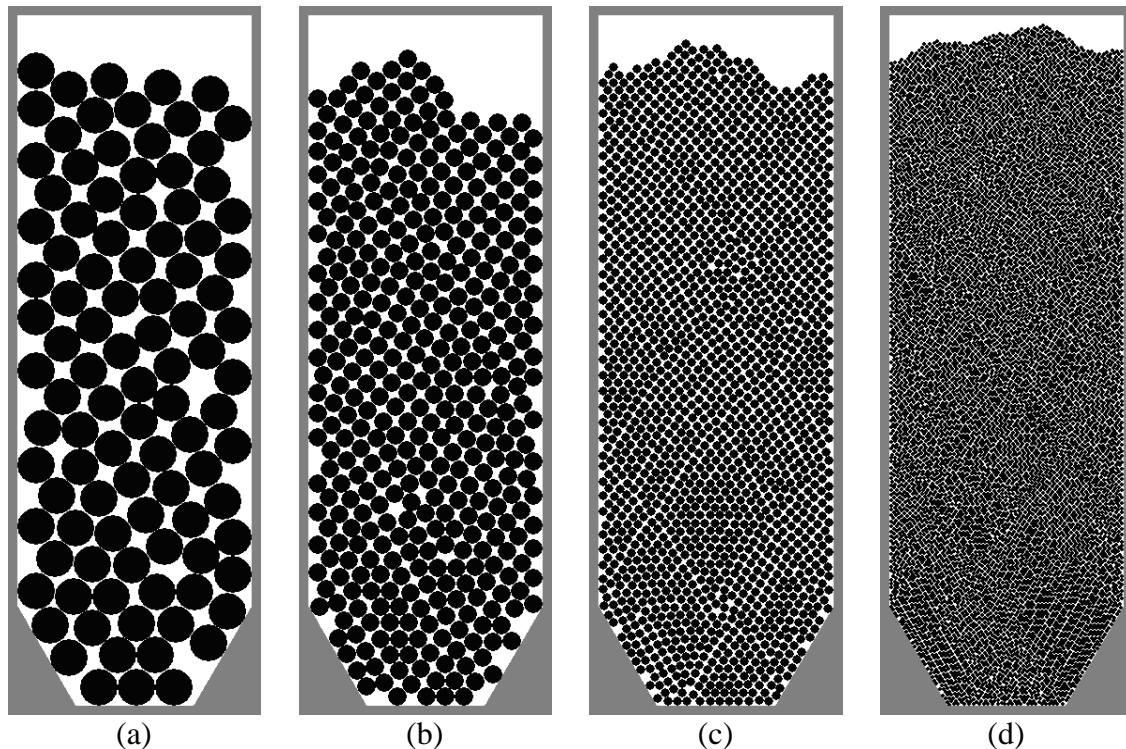


Figura 2 – Quatro pacotes granulares gerados pelo modelo proposto.

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. Para a aquisição da imagem do silo carregado com os discos utilizou-se uma câmera digital Cyber-Shot DSC-50H fabricada pela empresa Sony. Após a captura das imagens estas passaram por um tratamento no software ThumbsPlus Pro versão 6.0 desenvolvido pela Cerious Software, onde as imagens foram editadas de modo a conter apenas o silo e os discos em seu interior. Para tratar a imagem e contabilizar os poros foi usado o software proposto por Silva et alli (2007). A figura 3 apresenta o silo bidimensional carregado com 300 partículas de 2cm de diâmetro e inclinação da tremonha de 45° (figura 3a), a imagem digital tratada (figura 3b) e o resultado da análise desta usando o algoritmo proposto por Silva et alli (2007) (figura 3c). Já a figura 4, apresenta o silo bidimensional carregado com 100 partículas de 4cm de diâmetro e inclinação da tremonha de 60°. 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.

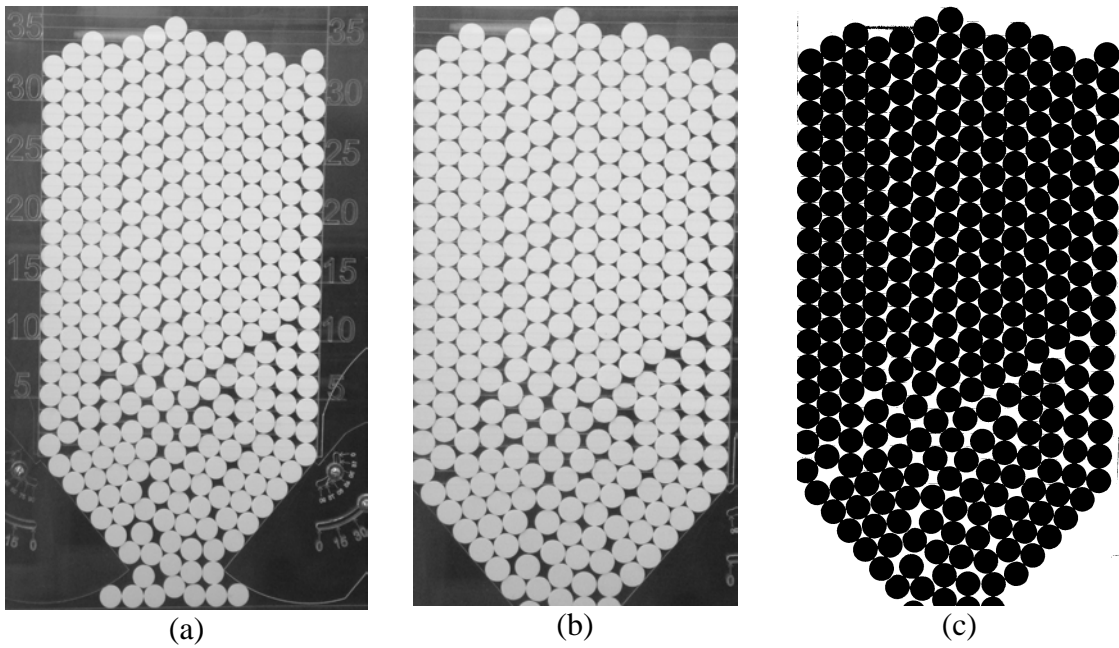


Figura 3 – (a) Silo bidimensional carregado com 300 discos de acrílico de 2cm de diâmetro, 0,2cm de espessura e ângulo do orifício de descarga de 45°, (b) imagem recordada e tratada e (c) resultado da análise da imagem digital.

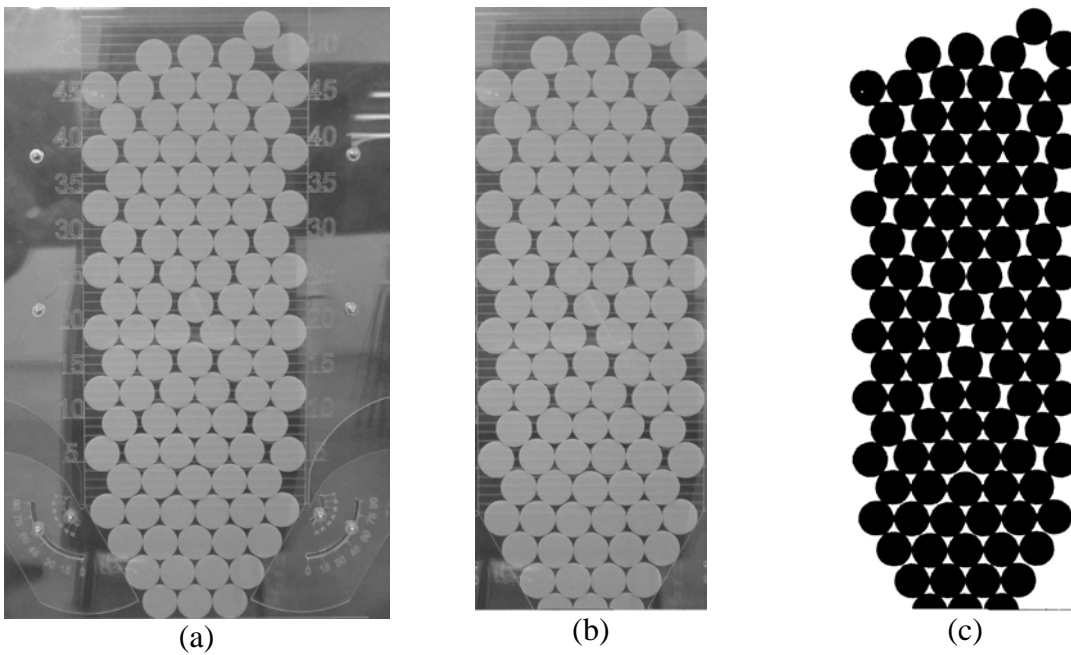


Figura 4 – (a) Silo bidimensional carregado com 100 discos de acrílico de 4cm de diâmetro, 0,2cm de espessura e ângulo do orifício de descarga de 60°, (b) imagem recordada e tratada e (c) resultado da análise da imagem digital.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados ensaios no silo bidimensional proposto com três inclinações diferentes da tremonha (45, 60 e 75°) para discos de acrílico de 2cm de diâmetro e com duas inclinações diferentes da tremonha (60 e 75°) para discos de acrílico de 4cm de diâmetro. No total foram analisadas 500 imagens, sendo 250 imagens para os experimentos com os discos de 2cm de diâmetro e 250 para os discos de 4cm de diâmetro. Os dados experimentais obtidos foram comparados com os dados simulados. No simulador, foram feitos empacotamentos granulares para inclinações de 0 a 90°, variando de 5 em 5°, para partículas de 2 cm. E, para partículas de 4 cm, foram feitas simulações para inclinações da tremonha de 45°, 60° e 75°. Desse modo, foram geradas um total de 1.085 simulações, nas quais 958 foram para partículas de 2cm de diâmetro.

A figura 5 apresenta um comparativo entre a porosidade experimental e a porosidade simulada encontrada para as inclinações de 45° (figura 5a), 60° (figura 5b) e 75° (figura 5c) das partículas de 2cm. E a figura 6 mostra os resultados para os discos de 4cm de diâmetro nas inclinações de 60° (figura 6a) e 75° (figura 6b).

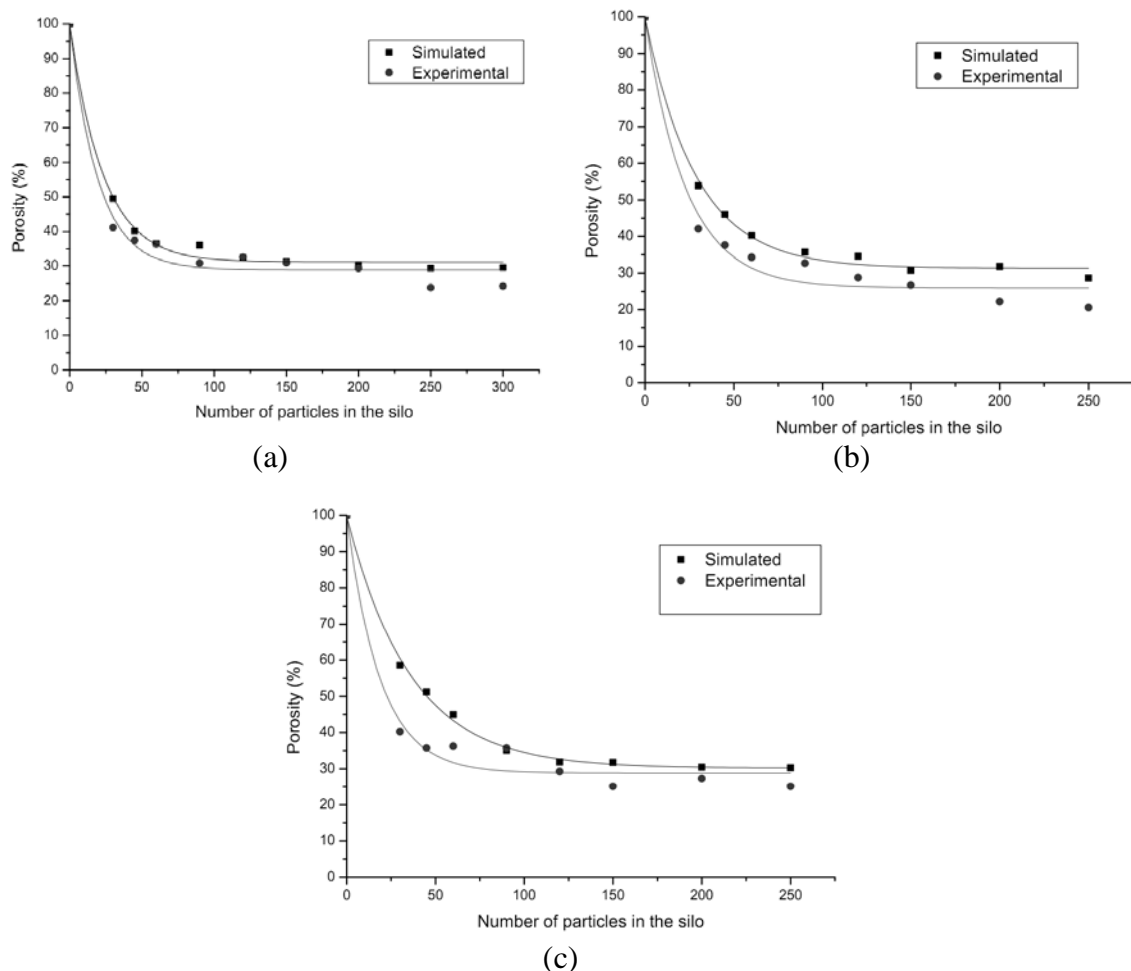


Figura 5 – Resultados comparativos entre os dados simulados e os dados experimentais para os discos de 2cm de diâmetro nas inclinações de: (a) 45°, (b) 60° e (c) 75°.

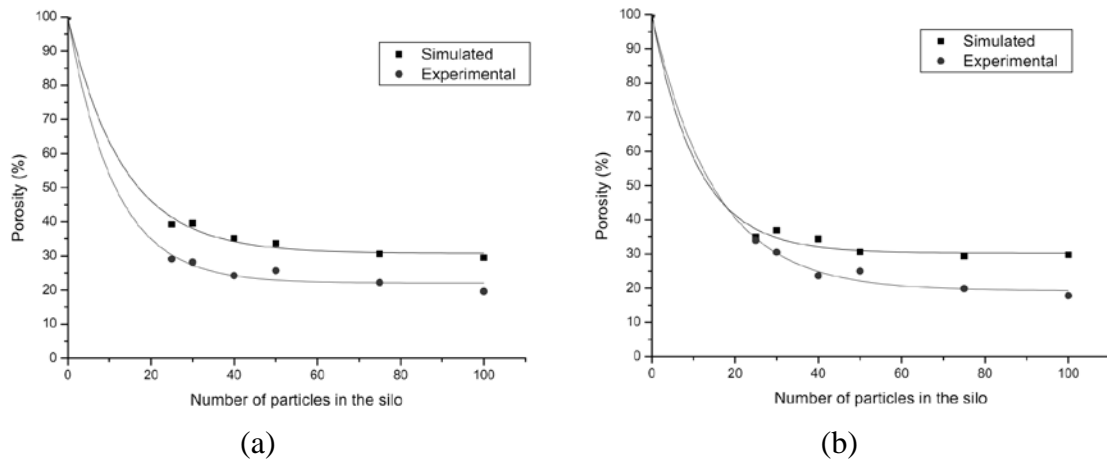


Figura 6 – Resultados comparativos entre os dados simulados e os dados experimentais para os discos de 4cm de diâmetro nas inclinações de: (a) 60° e (b) 75°.

O ajuste das curvas foi feito através de um decaimento exponencial de primeira ordem, dado por:

$$y = y_0 + Ae^{-x/t}$$

Onde y representa a porosidade, y_0 o valor mínimo da porosidade, x o número de partículas e A e t são constantes dependentes do diâmetro dos discos e da inclinação da tremonha. A maior concentração de dados simulados para as partículas de 2cm foi para que se pudesse obter informação necessária para construir um gráfico em três dimensões, podendo assim, relacionar a porosidade, o número de partículas e a inclinação da tremonha. A figura 7 mostra o gráfico 3D obtido.

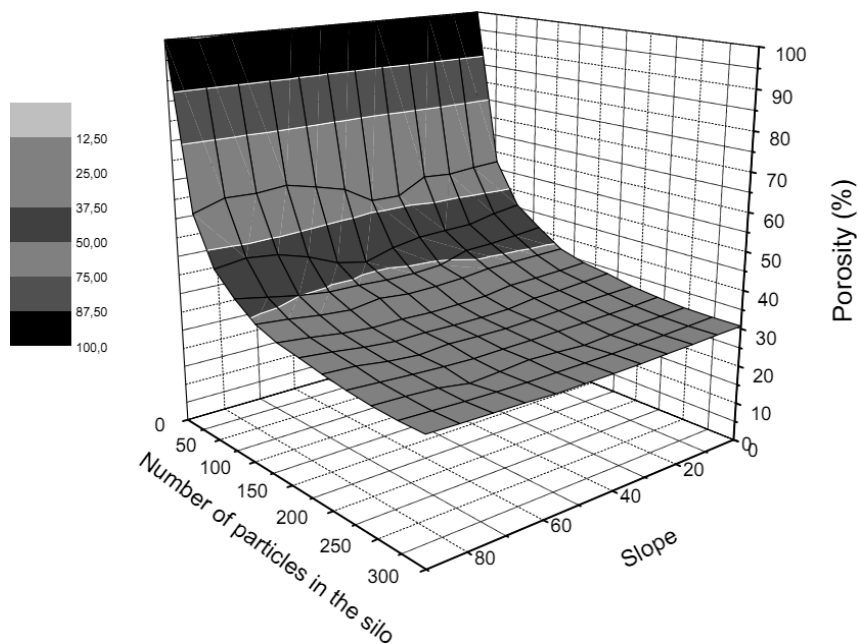


Figura 7 – Resultado tridimensional da porosidade para as simulações com discos de 2cm de diâmetro.

4. CONCLUSÕES

A análise de imagens digitais para a determinação da porosidade de pacotes granulares se mostrou uma ferramenta viável devido à alta velocidade de processamento e acurácia do algoritmo usado. O resultado encontrado para as partículas de 2cm atendem ao esperado na literatura, mostrando que a porosidade decresce com o aumento do número de discos dentro do silo, tendendo assintoticamente a um valor mínimo, que corresponde ao empacotamento máximo de discos.

O simulador mostrou-se eficiente, pois os gráficos feitos para comparar os dados experimentais com os dados simulados apontaram valores de porosidade semelhantes. O método de decaimento exponencial de primeira ordem usado para ajustar o gráfico mostrou-se bem eficaz, pois obteve um coeficiente de correlação maior que 95% com os valores de porosidade em todos os gráficos. A suavidade visualizada na superfície do gráfico tridimensional demonstra que os valores da porosidade são praticamente os mesmos para as diferentes inclinações da tremonha. Sendo, portanto, a porosidade influenciada quase que exclusivamente pela quantidade de partículas no silo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

Antonelli, M. A., Pollard, D. D. Distinct element modeling of deformation bands in sandstone. *Journal of Structural Geology*, v. 17, n. 8, p. 1165-1182, 1995.

Bobryakov, A. P. Influence of porosity on the viscous friction of a granular medium. *Journal of Mining Science*, v. 33, n. 3, p. 222-229, 1997.

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.

Silva, A. C., Luz, J. A. M., Bonfioli, L. F. Caracterização microestrutural de aços através de análise de imagem digital. In: II Simpósio Mineiro de Ciências dos Materiais, 2007, Ouro Preto. *Revista da Física de Ouro Preto*, v.1. p. 25–26, 2007.

Willingham, T. W., Werth, C. J., Valocchi, A. J. Evaluation of the effects of porous media structure on mixing-controlled reactions using pore-scale modeling and micromodel experiments. *Environmental Science & Technology*, v. 42, n. 9, p. 3185-3193, 2008.