

## TORTAS DE FILTRAGEM SIMULADAS EM 3D

*George Eduardo Sales Valadão<sup>1</sup>, Juliana Cristina Freitas Silva<sup>2</sup>, Sérgio Coutinho Amarante<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Professor, Dr. [gvaladao@demin.ufmg.br](mailto:gvaladao@demin.ufmg.br)

<sup>2</sup>Aluna de Graduação em Engenharia de Minas [julianacfs@ig.com.br](mailto:julianacfs@ig.com.br)

Departamento de Engenharia de Minas - UFMG

Rua Espírito Santo, 35 Sala 702 - 30160-030 - Belo Horizonte - MG - Brazil

<sup>3</sup>Engenheiro de Minas, Mestrando [sca@mbr.com.br](mailto:sca@mbr.com.br)

Minerações Brasileiras Reunidas - Avenida de Ligação, 3580 - 34000-000 - Nova Lima - MG - Brazil

### RESUMO

A filtragem, com formação de torta, tem sido utilizada na indústria mineral para o desaguamento de concentrados. A teoria clássica de filtragem é baseada na equação de Darcy, uma equação empírica que descreve de forma macroscópica o fluxo de um líquido através de um meio poroso. A modelagem da filtragem, sob um aspecto mais fundamental, requer tanto o conhecimento da microestrutura da torta formada quanto sua correlação com as propriedades macroscópicas. Simulações em 2D e em 3D, utilizando recursos computacionais, podem ser realizadas no sentido de se tentar representar a estrutura das tortas. O Método de Monte Carlo foi utilizado para a simulação de tortas de filtragem tendo estruturas formadas por esferas. As granulometrias de 3 diferentes produtos industriais foram consideradas para a simulação. Porosidade volumétrica (volume de poros /volume da torta), porosidade superficial (área de poros /área total de uma seção transversal da torta) e resistência específica de torta foram determinadas para as estruturas formadas. Alguns valores obtidos na simulação foram comparados com aqueles alcançados em teste de folha para os produtos industriais. Os resultados mostraram-se promissores para a simulação, em computador, de estruturas em 3D que sejam semelhantes a tortas de filtragem reais.

### INTRODUÇÃO

A filtragem com formação de torta é bastante utilizada na indústria mineral especialmente para o desaguamento de concentrados. Os filtros contínuos a vácuo têm tido expressiva aplicação no processamento de minérios de ferro tanto no Brasil quanto no mundo. Valores adequados de umidade de torta são altamente desejáveis tendo em vista o manuseio, transporte e a

eficiência de operações subsequentes. O teste de folha é o procedimento experimental que tem sido adotado para o dimensionamento e para a verificação do desempenho dos filtros contínuos a vácuo.

Vários trabalhos têm mostrado que a torta de filtragem é um meio poroso dotado de complexa estrutura que pode apresentar anisotropia (Kakwani et al., 1984; Shirato, 1972; Bourgeois e Lyman, 1997; Bourgeois e Barton, 1998). A forma e a distribuição de tamanhos dos poros não são usualmente conhecidos e de difícil avaliação. A modelagem da filtragem, dentro de uma abordagem clássica, baseia-se na equação de Darcy que representa uma avaliação macroscópica bastante simplificada dos sistemas reais (Dahlstrom e Silverblatt, 1977; Tiller, 1975; Ranjan e Hogg, 1996). A modelagem da filtragem, sob um aspecto mais fundamental, requer tanto o conhecimento da microestrutura da torta formada quanto sua correlação com propriedades macroscópicas. O estudo e a simulação de estruturas tem sido realizado sob diferentes abordagens como:

- i. observação experimental de meios porosos construídos a partir da utilização de esferas (Carman, 1937; Dexter e Tanner, 1972; Van Brakel e Heertjes, 1974; Wakeman, 1975);
- ii. utilização de dados de microscopia, obtidos a partir lâminas delgadas ou de seções polidas, para a caracterização das estruturas (Bourgeois e Barton, 1998; Jernot et al., 1992; Saltzman et al., 1987; Orem et al., 1996);
- iii. modelos teóricos (Ranjan e Hogg, 1996; Ouchlyama e Tanaka, 1984; Yu e Standish, 1987) que estimam as propriedades estruturais e de transporte dos meios porosos;
- iv. simulações, em computador, de estruturas utilizando esferas ou elipsóides em 2D e 3D (Kaush et al., 1971; Rosato et al., 1986; Chatzis e Dullien, 1977; Rodriguez et al. 1986; Soppe, 1990; Konakawa e Ishizaki, 1990; Reyes e Iglesia, 1991; Nolan e Kavanagh, 1993; Hogue e Newland, 1994; Hwang et

ali., 1997, Valadão et ali., 1999). As simulações em 3D tem se mostrado muito mais interessantes na reprodução de estruturas permitindo o estudo da filtragem sob um aspecto microscópico.

O Método de Monte Carlo foi utilizado neste trabalho para a simulação de 3 estruturas diferentes, em 3D, formadas por esferas de diversos tamanhos. Características como a porosidade volumétrica, porosidade superficial e resistência específica foram determinadas a partir das estruturas simuladas e comparadas com resultados de filtragem de tortas reais obtidas por meio de teste de folha.

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Um programa de computador (Yen e Lin, 1996), descrito em detalhe por Valadão et ali. (1999), foi utilizado na simulação das tortas de filtragem em 3D. O espaço usado foi de  $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m} \times 4000\mu\text{m}$ . Cada amostra simulada (A, B e C) segue a distribuição granulométrica de um dos três produtos industriais considerados. A forma da partícula foi assumida como esférica. A tabela I mostra a distribuição granulométrica das amostras simuladas.

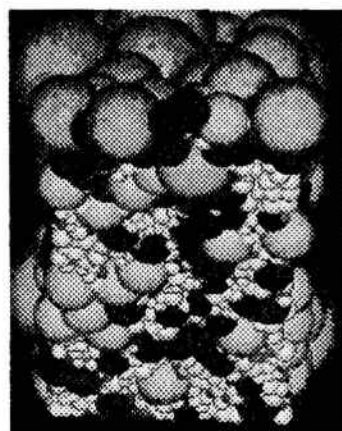
Tabela I – Distribuição granulométrica das amostras simuladas.

Tamanho ( $\mu\text{m}$ )	% Retida Simples Amostras		
	A	B	C
128	8,91	13,77	19,00
91	10,13	10,31	9,05
64	11,61	10,44	10,19
49	13,97	9,65	6,90
42	7,70	6,40	5,93
34	3,67	5,40	6,26
26	15,24	11,90	10,38
19	18,95	16,87	12,15
14	9,82	15,28	20,14

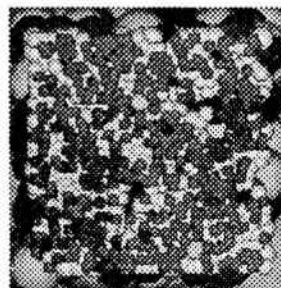
Os testes de filtragem foram realizados utilizando-se as amostras (Ai, Bi e Ci) que representam produtos industriais das Minerações Brasileiras Reunidas ("pellet feed"). O procedimento usado foi o do teste de folha com alimentação por cima. O meio filtrante é o mesmo utilizado nos filtros de disco industriais. O Índice de Blaine foi determinado para estas amostras: A=  $676 \text{ cm}^2/\text{g}$ , B=  $889 \text{ cm}^2/\text{g}$ , C=  $1293 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

### RESULTADOS

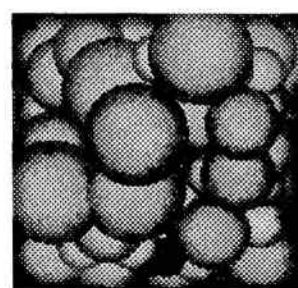
A figura 1 mostra a estrutura de uma torta obtida (vista lateral, inferior e topo) após a simulação, em 3D, para a amostra A. Verifica-se que esta estrutura caracteriza-se por uma certa segregação, isto é, as partículas de maior tamanho tendem a se posicionar no topo da estrutura enquanto que aquelas de menor tamanho tendem a se posicionar na base desta estrutura. Comportamento semelhante foi observado por Rosato et ali. (1986) fazendo simulações de estruturas em 2D.



a) vista lateral



b) vista inferior



c) vista de topo

Figura 1 - Torta simulada: a) vista lateral, b) vista inferior e c) vista de topo.

As figuras 2, 3 e 4 mostram os gráficos de altura de torta em função de porosidade superficial para as amostras A, B e C respectivamente.

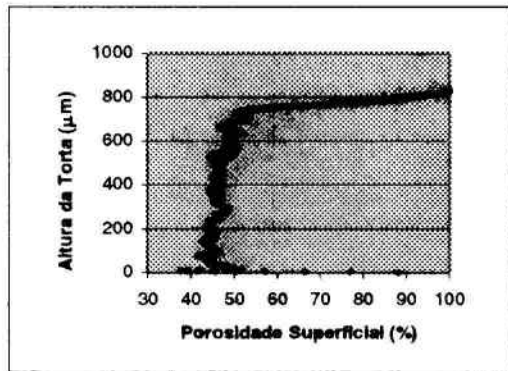


Figura 2 – Altura de torta em função da porosidade superficial para amostra A.

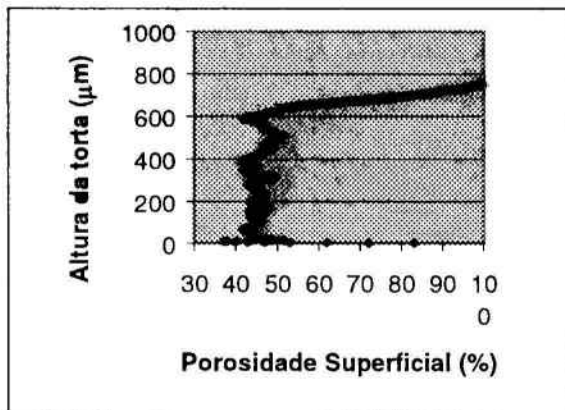


Figura 3 – Altura da torta em função da porosidade superficial para amostra B.

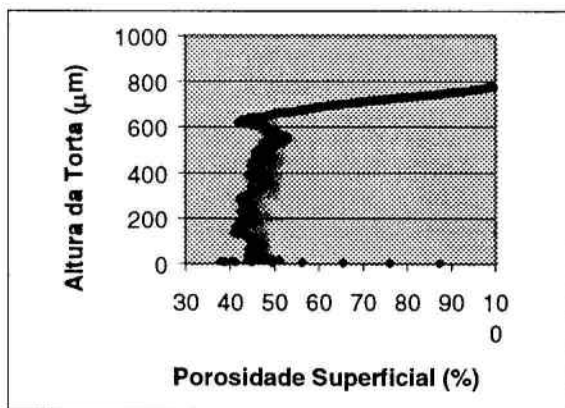


Figura 4 – Altura da torta em função da porosidade superficial para amostra C.

A porosidade superficial foi determinada em seções transversais a cada 1 µm em altura por meio de programa de computador (Lin, 1997). O comportamento da porosidade superficial em função da altura para as

tortas simuladas é similar para todas as amostras. Este comportamento está de acordo com resultados experimentais obtidos por Van Brakel e Heertjes (1974) que utilizaram a técnica de absorção de raios X para determinar a variação da porosidade superficial com a espessura da estruturas formadas.

A porosidade volumétrica foi calculada para cada amostra simulada considerando-se o espaço de 512 µm x 512 µm x altura final da torta já que o programa de simulação não define as paredes como intransponíveis. Os valores obtidos para as amostras A, B e C são respectivamente 45%, 41% e 40%. Estas estruturas formadas são, de acordo com Reyes e Iglesia (1991), randômicas de baixa densidade ("random loose packing"). A porosidade volumétrica das tortas reais foi estimada a partir dos resultados dos teste de folha. Os valores estimados para Ai, Bi e Ci são respectivamente (expressos em porcentagem) 51%, 56% e 55%. Verifica-se que os produtos industriais apresentaram valores de porosidade volumétrica maiores que os encontrados para as amostras simuladas. Esta tendência foi observada também por Valadão et al. (1999) e pode ser explicada principalmente pelo tipo de filtragem e pelo nível de vácuo utilizados.

Valores de resistência específica de torta foram calculados para as tortas simuladas usando a equação (1), derivada da equação de Carman-Koseny.

$$\alpha = [(K Sv^2)/\rho_s] [(1-\epsilon)/\epsilon^3] \quad (1)$$

onde:

$\alpha$  = resistência específica da torta (m/kg)

K = constante de Koseny (adimensional)

$\epsilon$  = porosidade volumétrica (adimensional)

Sv = área superficial específica (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)

Os resultados foram: amostra A = 2,16x10<sup>8</sup> m/kg, amostra B = 3,48x10<sup>8</sup> m/kg e amostra C = 3,71x10<sup>8</sup> m/kg. Os valores de resistência específica não foram calculados para as amostras reais. Deve-se observar, contudo, que resultados de laboratório (teste de folha) e industriais indicam que o desempenho da filtragem, em condições normais de operação, é melhor quando a amostra Ai (correspondente à amostra A simulada) é alimentada nos filtros de disco industriais.

Espera-se que as estruturas simuladas, neste trabalho, possam ser utilizadas no futuro em conjunção com imagens de tortas reais para o desenvolvimento de modelos de filtragem mais abrangentes e precisos tendo como ponto de partida os aspectos microscópicos.

## CONCLUSÕES

- i. É possível simular estruturas em 3D, que se assemelham à tortas de filtragem, utilizando o Método de Monte Carlo.
- ii. As tortas simuladas representam estruturas randômicas de baixa densidade ("random loose packing").
- iii. Os valores calculados de porosidade volumétrica para as tortas simuladas foram menores que aqueles determinados para os produtos industriais.
- iv. Os valores de resistência específica estimados para as tortas simuladas estão de acordo com resultados obtidos em laboratório e em escala industrial.
- v. As imagens, em 3D, obtidas para amostras simuladas indicam a importância do mecanismo de segregação para a formação destas tortas.
- vi. A análise mais detalhada dos poros, sua estrutura, distribuição e interconexão, é necessária tendo-se em vista uma previsão mais precisa do transporte do fluido através da torta.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq pela concessão da Bolsa de Iniciação Científica para um dos autores e a Minerações Brasileiras Reunidas – MBR, pela cessão das amostras minerais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bourgeois, F. S.; Lyman, G. J. Morphological Analysis and Modeling of Fine Coal Filter Cake Microstructure. *Chemical Engineering Science*, Vol. 52, 1997, p. 1151-1162.
- Bourgeois, F. S.; Barton, W. A. Advances in the Fundamentals of Fine Coal Filtration. *Coal Preparation*, Vol. 19, 1998, p. 9-31.
- Carman, P. C. Fluid Flow through Granular Beds. *Trans. Instn Chem. Engrs*, Vol. 15, 1937, p. 32-48.
- Chatzis, I.; Dullien, F. A. Modelling Pore Structure by 2D and 3D Networks with Application to Sandstones. *J. Can. Pet. Technol.*, Vol. 16, 1977, p.97-108.
- Dahlstrom, D. A.; Silverblatt, C. E. Continuous Vacuum and Pressure Filtration. In: D. B. Purchas (ed). *Solid Liquid Separation and Scale Up*. UpLands Press. Croydon, 1977. p. 445-491.
- Dexter, A. R.; Tanner, D. W. Packing Densities of Mixtures of Spheres with Log-Normal Size Distributions. *Nature Physical Science*, Vol. 238, 1972, p. 31-32.
- Hogue, C.; Newland, D. Efficient Computer Simulation of Moving Granular Particles. *Powder Technology*, Vol. 78, 1994, p. 51-56.
- Hwang, K. J.; Wu, Y. S.; Lu, W. M. Effect of the Size Distribution of Spheroidal Particles on the Surface Structure of a Filter Cake. *Powder Technology*, Vol. 91, 1997, p.105-113.
- Jernot, J. P.; Prasad, P.B.; Demaleprade, P. Three Dimensional Simulation of Flow through a Porous Medium. *Journal of Microscopy*, Vol. 167, 1992, p. 9-21.
- Kakwani, R. M.; Chiang, S.H.; Klinzing, G. E. Effect of Filter Cake Structure on Dewatering of Fine Coal. *Minerals and Metallurgical*, Vol 1, 1984, p.113-117.
- Kaush, H. H.; Fesko, D. G.; Tschoegl, N. W. The Random Packing of Circles in a Plane. *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 37, 1971, p. 603-611.
- Konakawa, Y.; Ishizaki, K. The Particle Size Distribution for the Highest Relative Density in a Compacted Body. *Powder Technology*, Vol. 63, 1990, p. 241-246.
- Nolan, G. T.; Kavanagh, P. E. Computer Simulation of Random Packings of Spheres with Log-Normal Distributions. *Powder Technology*, Vol. 76, 1993, p. 309-316.
- Lin, C. L. Porosity Calculation of Sectioned Image of the Packed Spheres Data. University of Utah, Salt Lake City, 1997.
- Orem, P.; Bakke, S.; Nilsen, L. S.; Henriquez, A. Prediction of Relative Permeability and Capillary Pressure from Pore-Scale Modeling. *Proceedings of 5th European Conference on Mathematics of Oil Recovery*, Leoben, Austria, Set., 1996.
- Ouchlyama, N.; Tanaka, T. Porosity Estimation for Random Packings of Spherical Particles. *Ind.Chem.Fundam*, Vol. 23, 1984, p. 490-493.

- Ranjan, S.; Hogg, R. The Role of Cake Structure in the Dewatering of Fine Coal by Filtration. *Coal Preparation*, Vol. 17, 1996, p. 71-87.
- Reyes, S. C.; Iglesia, E. Monte Carlo Simulations of Structural Properties of Packed Beds. *Chemical Engineering Science*, Vol. 46, 1991, p. 1089-1099.
- Rodriguez, J.; Allibert, C. H.; Chaix, J. M. A Computer Method for Random Packing of Spheres of Unequal Size. *Powder Technology*, Vol. 47, 1986, p. 25-33.
- Rosato, A.; Prinz, F.; Stanburg, K. J.; Swendsen, R. Monte Carlo Simulation of Particulate Matter Segregation. *Powder Technology*, Vol. 49, 1986, p. 59-69.
- Saltzman, W. M.; Paternak, S. H.; Langer, R. Quantitative Image Analysis for Developing Microstructural Descriptions of Heterogeneous Materials. *Chemical Engineering Science*, Vol. 42, 1987, p. 1989-2004.
- Shirato, M. Verification of Internal Flow Mechanism Theory of Cake Filtration. *Filtration & Separation*, 1972, p. 290-298.
- Soppe, W. Computer Simulation of Random Packings of Hard Spheres. *Powder Technology*, Vol. 62, 1990, p. 189-196.
- Tiller, F. M. What the Filter Man Should know about the Theory. *Filtration & Separation*, 1975, p. 386-394.
- Valadão, G. E. S.; Lin, C. L.; Miller, J. D. Filter Cake Structure as Revealed by 3D Simulation Using Monte Carlo Method. In: SME Annual Meeting, Denver, Colorado, EUA, 1999 (CD ROM).
- Van Brakel, J.; Heertjes, P. M. Homogeneous Particle Packings and Porous Masses. Some Experimental Techniques. *Powder Technology*, Vol. 9, 1974, p. 263-271.
- Wakeman, R. J. Packing Densities of Particles with Log-Normal Size Distribution. *Powder Technology*, Vol. 11, 1975, p. 297-299.
- Yen, Y. K.; Lin, C. L. 3D Simulation of Particles Dropping under Gravity Force. University of Utah, Salt Lake City, 1996.
- Yu, A. B.; Standish, N. Porosity Calculations of Multi-Component Mixtures of Spherical Particles. *Powder Technology*, Vol. 52, 1987, p. 233-241.