

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA DINÂMICA DE GRÃOS DE CAFÉ VERDE EM UM TAMBOR ROTATÓRIO NO REGIME DE ROLAMENTO

A.H. JESUS¹, D. P. FURTADO¹, I. A. RESENDE¹, M. A. S. BARROZO¹ e C. R. DUARTE¹

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química
E-mail para contato: claudiofequfu@gmail.com

RESUMO – O Brasil se destaca como maior produtor, exportador e segundo maior consumidor mundial de café. Sabe-se que tambores rotatórios podem ser utilizados durante o beneficiamento do café, nas etapas de secagem e torrefação. Sendo assim, o estudo dos fenômenos físicos que ocorrem no interior de um tambor rotatório é de extrema importância para conhecer a dinâmica das partículas em seu interior. As propriedades do material particulado, as características geométricas e as condições operacionais do tambor influenciam no surgimento de diferentes regimes de escoamento das partículas. No presente estudo, com o objetivo de caracterizar o comportamento do material particulado no regime de rolamento, especificamente, utilizou-se uma técnica de análise de imagens gravadas com uma câmera de alta velocidade. Obteve-se, experimentalmente, os perfis de velocidade das partículas de café verde no regime de rolamento para diferentes níveis de enchimento e velocidades de rotação do equipamento. Sendo assim, os resultados possibilitaram uma análise da influência da velocidade de rotação do cilindro e do nível de preenchimento do tambor sobre o deslocamento das partículas e a espessura da camada ativa no interior do tambor.

1. INTRODUÇÃO

O café desempenha um papel de extrema importância no cenário econômico, político, social e ambiental do Brasil. O fruto é produzido em quatro continentes, sendo que as regiões que apresentam maior projeção mundial se encontram na América do Sul, África, Ásia e América Central. O Brasil é o maior produtor, exportador e o segundo maior consumidor mundial de café (Thomaziello *et al.*, 2013; EMBRAPA, 2015).

Os estados que mais se destacam na produção de café são Minas Gerais, que é responsável por 51,59% da produção do país; e o Espírito Santo, correspondendo a 24,76% da produção nacional. Estudos feitos pela ABIC (Associação Brasileira da Indústria de Café) em 2016 mostram que o café é consumido em 98,2 % dos lares brasileiros e seu consumo tem crescido nos últimos anos. Diante da grande demanda de mercado imposta sobre o produto, estudos relacionados a melhoria do processo de beneficiamento do café são de grande relevância.

Sabe-se que os tambores rotatórios possuem uma ampla aplicação em diferentes setores industriais como misturadores, granuladores, reatores, secadores, dentro outros. Em especial,

os tambores rotatórios são utilizados durante o beneficiamento do café, nas etapas de secagem e torrefação. Segundo Ding *et al.* (2001) este uso generalizado pode ser explicado devido à sua capacidade de lidar com vários tipos de matérias-primas como, por exemplo, lamas e materiais granulares que apresentam uma larga faixa de distribuição de tamanhos e diferenças significativas em suas propriedades físicas.

Como observado por Mellmann *et al.* (2001) o movimento dos sólidos nos tambores rotatórios é dependente de diferentes variáveis operacionais e de elementos internos do tambor. De acordo com tais variáveis podem surgir no interior dos tambores rotatórios os regimes de deslizamento, caimento ou “avalanche”, rolamento, cascadeamento, catarateamento e centrifugação. Dentre estes, os regimes de caimento, rolamento e cascadeamento, são os mais utilizados em processos industriais, como por exemplo, granulação, mistura, secagem e recobrimento, enquanto que o regime de catarateamento é, empregado nos processos de moagem (Henein *et al.*, 1983).

No regime de rolamento, interesse do estudo desenvolvido no presente trabalho, o leito do material pode ser dividido em duas zonas distintas, sendo elas: a região passiva onde as partículas são arrastadas para cima pela parede do tambor; e a região ativa, de menor espessura, na qual as partículas se deslocam sobre a superfície do leito. Na região passiva, o material se move como um corpo rígido e a taxa de mistura entre as partículas é insignificante. Já na camada ativa, a mistura do material é intensa e ocorrem os principais mecanismos de transferência de massa e energia (Boateng e Barr, 1997; Santos *et al.*, 2015).

Dessa forma, esse trabalho obteve os perfis de velocidades dos grãos de café verde referentes ao regime de rolamento em diferentes condições operacionais para avaliar a influência da velocidade de rotação do tambor e do seu grau de enchimento sobre a espessura da camada ativa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material particulado utilizado para os testes foram grãos de café verde (Figura 1). A densidade do material (ρ_s) foi medida com um picnômetro a gás hélio (modelo *Micromeritics AccuPyc 1331*). O diâmetro característico (d_{50}) e a esfericidade dos grãos (ϕ) foram determinados com o equipamento CAMSIZER, que utiliza uma técnica de análise de imagens projetadas das partículas analisadas. Também obteve-se a umidade do café (U), em base seca, pelo método da estufa por 24 h a 105°C. Os valores encontrados para estas propriedades estão listados na Tabela 1.

Figura 1 – Grãos de café verde



Tabela 1 – Propriedades do café verde

ρ_s [kg/m ³]	d_{50} [mm]	ϕ [-]	U [-]
1368,3 ± 3,9	5,24	0,88	12,15 ± 0,10

A unidade experimental empregada para realização deste estudo está indicada na Figura 2. Esta unidade possui um tambor de aço inox (item 1) de dimensões: diâmetro de 21,5 cm e comprimento igual a 50 cm, um motor (item 2) de 1710 rpm e um inversor de frequência (item 3), para controlar a velocidade de rotação do tambor. As paredes frontal e traseira do tambor são constituídas de vidro para possibilitar a visualização do interior do equipamento e facilitar a filmagem do material em escoamento, feita com uma câmera de alta velocidade (item 4) (velocidade máxima de captura de 2000 frames/s). O interior do tambor é revestido por uma lixa P80 para evitar o regime de deslizamento e possibilitar a formação dos regimes de interesse mesmo nos menores níveis de enchimento.

Os perfis de velocidade das partículas foram obtidos por meio das filmagens feitas com a câmera de alta velocidade e a utilização dos softwares *ImageJ* e *MeazureTM*, possibilitando o mapeamento individual das partículas em diferentes quadros. A velocidade de cada uma das partículas foi calculada pela subtração da posição inicial e final e posterior divisão pelo intervalo de tempo. A Figura 3 apresenta a localização da linha de referência para o raio do leito, ao longo da qual foram medidos os valores de velocidade. Para cada raio (r), as medidas foram feitas em duplicatas.

Figura 2 – Unidade experimental e a câmera de alta velocidade utilizadas nos experimentos

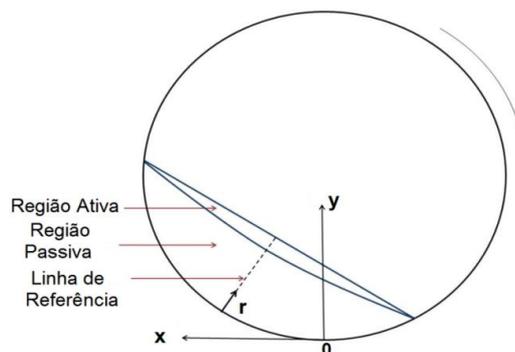


Para os 5 níveis de enchimentos avaliados (10, 20, 30, 40 e 50%) as velocidades de rotação do tambor utilizadas para obtenção dos perfis de velocidades foram: 12, 13, 16 e 18 rpm.

Para determinar a localização da interface ativa-passiva (região da inversão de sentido das velocidades), foi observado que tanto na camada ativa quanto na camada passiva, a velocidade varia linearmente com o raio. Assim, as equações das retas para descrever cada

uma das regiões foram encontradas e então, a interseção entre as duas retas determinava o ponto de transição entre as camadas.

Figura 3 – Região ativa, região passiva e linha de referência usada na metodologia para calcular os perfis de velocidade das partículas



3. RESULTADOS

Para determinação da espessura da camada ativa, região do leito de partículas observada no regime de rolamento na qual ocorre a mistura efetiva do material particulado, foram obtidos inicialmente os perfis de velocidade dos grãos de café verde para diferentes condições operacionais.

A Figura 4 apresenta perfis de velocidade típicos para o material particulado em estudo. Tais dados foram obtidos para um grau de enchimento constante e igual a 10% para as velocidades de rotação do tambor iguais a 12,13, 16 e 18 rpm. Todos os perfis de velocidade apresentados na Figura 4 possuem um comportamento característico, que também foi observado para todas as demais condições avaliadas. Nota-se que para a posição mais próxima da parede do tambor, as partículas apresentaram velocidades próximas a velocidade de rotação do tambor. Com o aumento da posição, esta velocidade decresce até próxima de zero, neste ponto tem-se a inversão do sentido de deslocamento do material e o final da camada passiva. Após o ponto de inversão, localiza-se a região ativa que é caracterizada pelo aumento da velocidade à medida que aumenta-se a posição.

Na Tabela 2 estão apresentados os valores de espessura da camada ativa para as condições experimentais empregadas. Em ordem crescente do grau de enchimento do cilindro, tem-se que da menor rotação testada (12,0 rpm) para a maior (18,0 rpm) há um aumento nesta espessura de: 20, 25% (enchimento de 10%), 13, 55% (enchimento de 20%), 28,70% (enchimento de 30%), 25,51% (enchimento de 40%) e 16,38% (enchimento de 50%). Nota-se então, que o aumento da velocidade de rotação do tambor leva a um aumento da espessura da região ativa.

Além disso, mantendo-se a velocidade de rotação do tambor a 12 rpm e variando-se o enchimento de 10% para 50%, observa-se um aumento da espessura da região ativa igual a 79,75%. Considerando-se essa mesma variação no enchimento, tem-se um aumento da espessura de 73,41% (velocidade de 13 rpm), 77,47% (velocidade de 16 rpm) e 73,97% (velocidade de 18 rpm). Pode-se afirmar, assim, que um aumento no nível de enchimento do

tambor rotatório tem como consequência o aumento da espessura da camada ativa no regime de rolamento.

Figura 4 – Perfil de velocidade dos grãos de café verde para as velocidades de rotação do tambor: (a) 12 rpm; (b) 13 rpm; (c) 16 rpm; (d) 18 rpm.

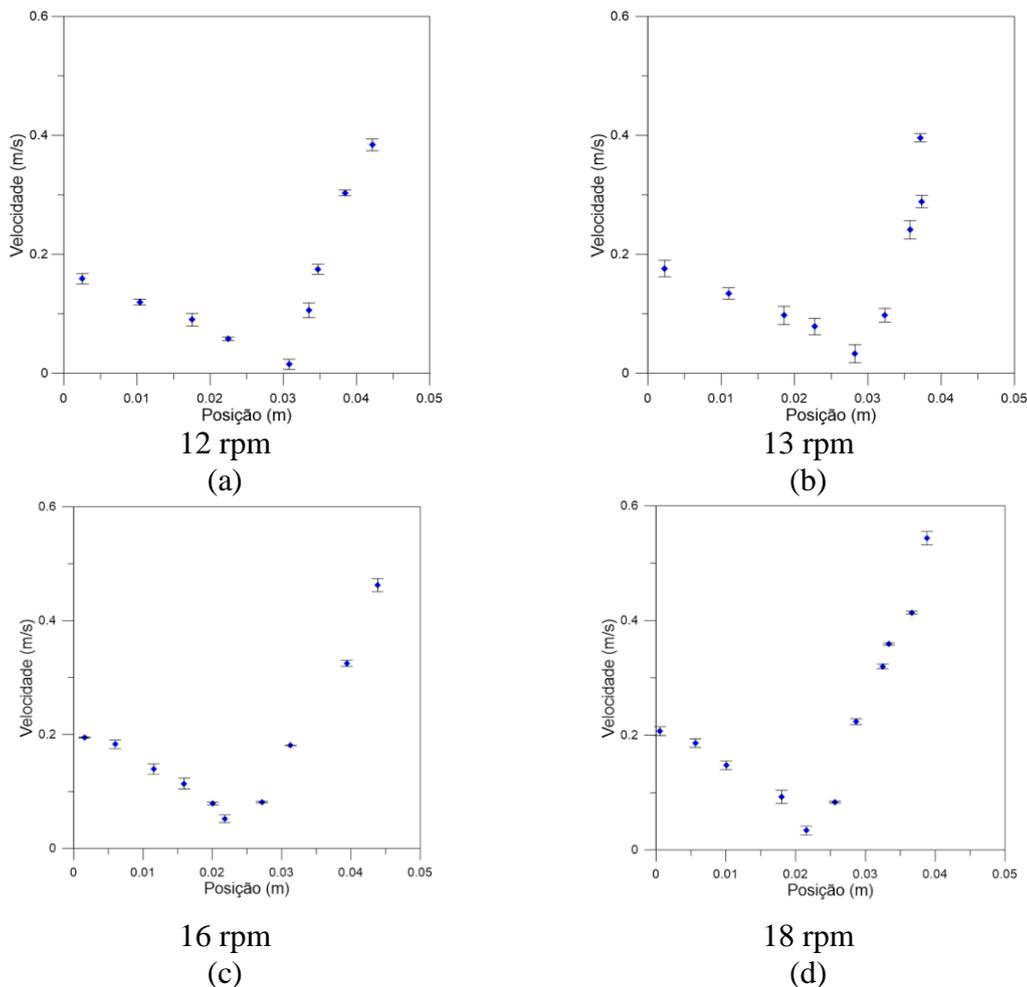


Tabela 2 – Variação da espessura da camada ativa com o enchimento e velocidade de rotação do tambor para o café verde.

Velocidade do Tambor (RPM)	Espessura da Camada Ativa (cm)				
	Enchimento do Tambor				
	10%	20%	30%	40%	50%
12,0	1,63 ± 0,02	2,14 ± 0,01	2,16 ± 0,03	2,43 ± 0,03	2,93 ± 0,13
13,0	1,73 ± 0,02	2,34 ± 0,06	2,51 ± 0,05	2,63 ± 0,05	3,00 ± 0,09
16,0	1,82 ± 0,08	2,35 ± 0,03	2,60 ± 0,03	2,81 ± 0,03	3,23 ± 0,04
18,0	1,96 ± 0,13	2,43 ± 0,10	2,78 ± 0,08	3,05 ± 0,08	3,41 ± 0,04

4. CONCLUSÃO

O estudo experimental desenvolvido no presente trabalho permitiu a análise, de maneira mais detalhada, da dinâmica dos grãos de café no interior de um tambor rotatório no regime de rolamento. A técnica de imagens empregada para determinar os perfis de velocidade do material particulado utilizado no estudo obteve resultados satisfatórios. Por meio da metodologia usada também foi possível encontrar a espessura da camada ativa relativa as diferentes velocidades de rotação (12, 13, 16 e 18 rpm) e graus de enchimento do cilindro (10, 20, 30, 40 e 50%) testados.

Tendo em vista os resultados experimentais apresentados, foi possível concluir que a espessura da camada ativa é fortemente influenciada pelo nível de enchimento e também pela rotação do tambor. A caracterização desta região do leito é relevante uma vez que nela ocorrem os principais mecanismos de transferência de massa e energia.

5. REFERÊNCIAS

- ABIC, Consumo de café no Brasil mantém-se quase estável e acima de 20 milhões de sacas. Disponível em: <http://www.abic.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=61#consint2015.2>, Acessado em 03/11/16.
- BOATENG, A.A., BARR, P.V., Granular flow behaviour in the transverse plane of a partially filled rotating cylinder, *Journal of Fluid Mechanics*, v. 330, p. 233-249, 1997.
- DELELE, M.A., WEIGLER, F., FRANKE, G., MELLMANN, J. Studying the solids and fluid flow behavior in rotary drums based on a multiphase CFD model. *Powder Technology*, vol.292, p.260-271, 2016.
- DING, Y.L., SEVILLE, J.P.K., FORSTER, R., PARKE R.D.J. Solids motion in rolling mode rotating drums operated at low to medium rotational speeds, *Chemical Engineering Science*, v. 56, p.1769-1780, 2001.
- EMBRAPA, Café é a segunda bebida mais consumida no Brasil. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2574254/cafe-e-a-segunda-bebida-mais-consumida-no-brasil/>, Acessado em 05/09/15.
- HENEIN, H., BRIMACOMBE, J.K., WATKINSON, A.P. Experimental study of transverse bed motion in rotary kilns. *Metallurgical Transactions B*, v.14, p.191-205, 1983.
- MELLMANN, J., The transverse motion of solids in rotating cylinders—forms of motion and transition behavior, *Powder Technology*, vol. 118, p. 251-270, 2001.
- SANTOS, D.A., DADALTO, F.O., SCATENA, R., DUARTE, C.R., BARROZO, M.A.S., A hydrodynamic analysis of a rotating drum operating in the rolling regime, *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 94, p. 204-2012, 2015.
- THOMAZIELLO, R. A. Cultura do Café. 2. ed. Boletim técnico, CATI/ Campinas, n. 193, 2013.