

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

A.H. JESUS<sup>1</sup>, D. P. FURTADO<sup>1</sup>, I. A. RESENDE<sup>1</sup>, M. A. S. BARROZO<sup>1</sup> e C. R. DUARTE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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 ( $\rho_s$ ) foi medida com um picnômetro a gás hélio (modelo *Micromeritics AccuPyc 1331*). O diâmetro característico ( $d_{50}$ ) e a esfericidade dos grãos ( $\phi$ ) 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

$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$d_{50}$ [mm]	$\phi$ [-]	$U$ [-]
$1368,3 \pm 3,9$	5,24	0,88	$12,15 \pm 0,10$

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 *Meazure<sup>TM</sup>*, 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

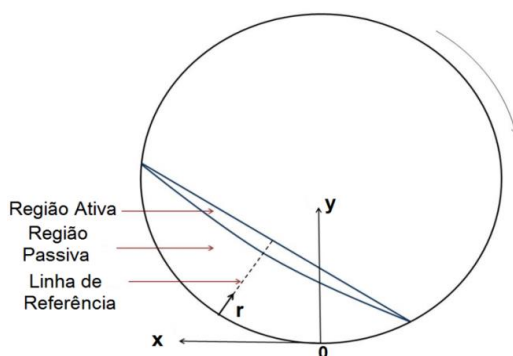


Para os 5 níveis de enchimentos avaliados (10, 20, 30, 40 e 50%) as velocidades de rotação do tambor utilizadas para obtenção dos perfis de velocidades foram: 12, 13, 16 e 18 rpm.

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.

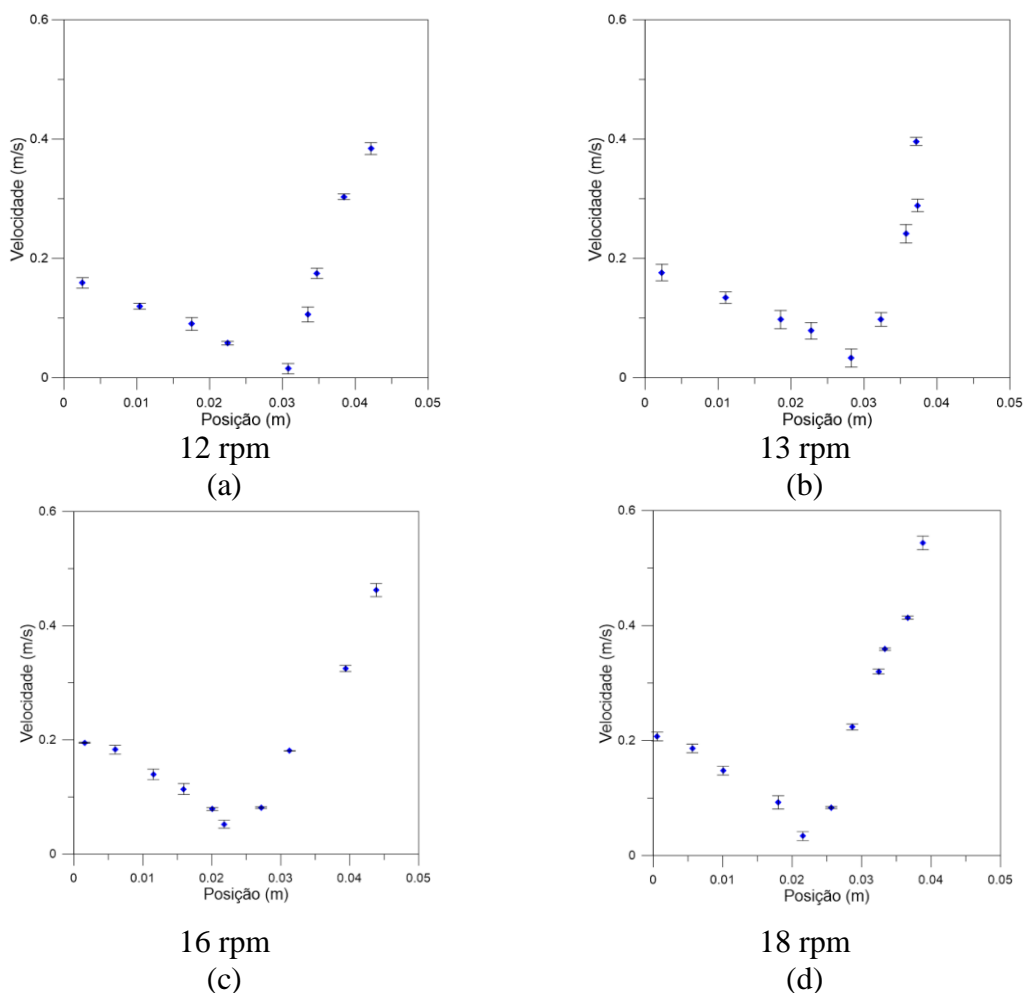


Tabela 2 – Variação da espessura da camada ativa com o enchimento e velocidade de rotação do tambor para o café verde.

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