



**Universidade Federal de Uberlândia**  
**Faculdade de Engenharia Química**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



**ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DA DINÂMICA DE  
GRÃOS DE CAFÉ EM UM TAMBOR ROTATÓRIO**

Isabela Araújo Resende

**Uberlândia – MG**

**2017**



**Universidade Federal de Uberlândia**  
**Faculdade de Engenharia Química**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



## **ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DA DINÂMICA DE GRÃOS DE CAFÉ EM UM TAMBOR ROTATÓRIO**

Isabela Araújo Resende

Orientadores:

Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte

Prof. Dr. Marcos A. de Souza Barrozo

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

**Uberlândia –MG**

**2017**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

R433e  
2017 Resende, Isabela Araújo, 1992-  
Estudo experimental e numérico da dinâmica de grãos de café em um tambor rotatório [recurso eletrônico] / Isabela Araújo Resende. - 2017.

Orientador: Cláudio Roberto Duarte.

Coorientador: Marcos A. de SouzaBarrozo.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Programa de Pós-graduação em Engenharia Química.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.5507>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Química. 2. Café - Produção. 3. Dinâmica da partícula. 4. Escoamento. I. Duarte, Cláudio Roberto, 1975-, (Orient.). II. Barrozo, Marcos A. de Souza, 1961-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. IV. Título.

---

CDU: 54

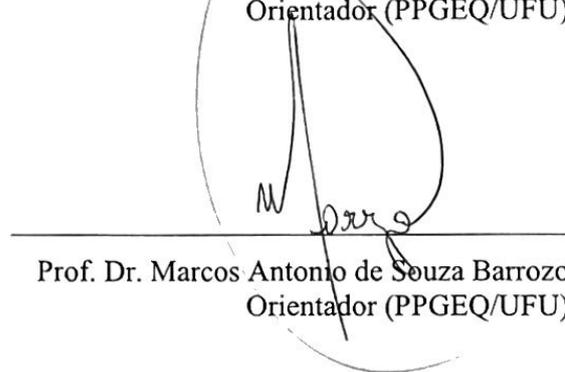
Rejâne Maria da Silva  
Bibliotecária Documentalista – CRB6/1925

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 23 DE FEVEREIRO DE 2017.

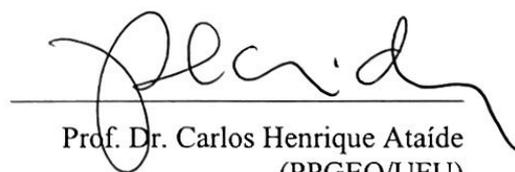
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte  
Orientador (PPGEQ/UFU)



Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo  
Orientador (PPGEQ/UFU)



Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde  
(PPGEQ/UFU)



Prof. Dr. José Luiz Vieira Neto  
(DEQ/ICTE/UFTM)



Dr. Márcio Ricardo Pivello  
(FEMEC/UFU)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



Ata da defesa de QUALIFICAÇÃO DE MESTRADO junto ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

Defesa de: Qualificação de Mestrado, 05/2017, PPGEQ

Data: 01 de fevereiro de 2017 – 14:00

Discente: 11512EQU004 – ISABELA ARAÚJO RESENDE

Título do Trabalho: ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DA DINÂMICA DE GRÃOS DE CAFÉ EM UM TAMBOR ROTATÓRIO

Área de concentração: DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS QUÍMICOS

Linha de pesquisa: PROCESSO DE SEPARAÇÃO

Projeto de Pesquisa de Vinculação: ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DA DINÂMICA DE PARTÍCULAS EM UM TAMBOR ROTATÓRIO

Às 14 horas do dia 01 de fevereiro do ano de 2017, na sala 1K228 - *Campus Santa Mônica* da Universidade Federal de Uberlândia, reuniu-se a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Márcio Ricardo Pivello - FEMEC/UFU; Carlos Henrique Ataíde - PPGEQ/UFU; Marcos Antonio de Souza - PPGEQ/UFU e Cláudio Roberto Duarte - PPGEQ/UFU orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu a Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

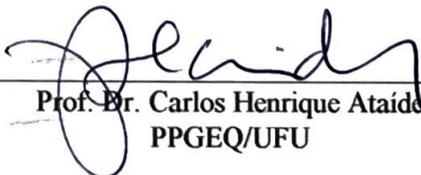
A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais.

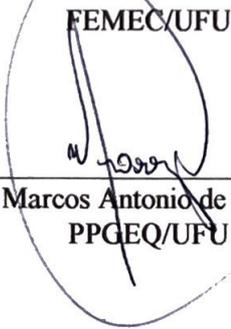
Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou a candidata Aprovada e no estabeleceu novo título para o trabalho: \_\_\_\_\_

Esta defesa de Qualificação de Mestrado é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos às 16 horas e 05 minutos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Márcio Ricardo Pivello  
FEMEC/UFU

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde  
PPGEQ/UFU

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo  
PPGEQ/UFU

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte  
PPGEQ/UFU - Orientador

## AGRADECIMENTOS

A realização desta pesquisa não teria sido possível se eu não tivesse recebido apoio de tantas pessoas e espero aqui conseguir agradecer, pelo menos um pouco, a todos que contribuíram comigo de alguma forma para o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço a Deus por toda a proteção e encaminhamento ao longo do caminho. Também agradeço aos meus pais e ao meu irmão, por toda dedicação, cuidado, paciência e amor demonstrados não somente nesta etapa, mas durante toda a minha vida.

Agradeço imensamente aos meus orientadores, Claudio Roberto Duarte e Marcos Antonio de Souza Barrozo, por todo o auxílio e direcionamento a mim oferecidos. É uma honra ter sido orientada por profissionais tão competentes e que sempre demonstraram confiança e paciência nos momentos que precisei.

Deixo um grande agradecimento a todos os companheiros de laboratório. Os encontros de comemoração e também a companhia diária ajudaram a deixar a caminhada mais leve. De forma especial ao “grupo da simulação”: Suellen, Marcela, Rondinelli e Rodolfo, que se mostraram sempre solícitos em tirar as dúvidas e ajudaram a superar as dificuldades. Também ao Dyrney, que já foi parte deste grupo, pela paciência em responder a todas as minhas questões e por todas as contribuições feitas ao meu trabalho.

Este agradecimento também se estende aos meus alunos de iniciação científica, Arthur e Daniel, pelos esforços dedicados a pesquisa e pelo comprometimento demonstrado neste período. Espero ter contribuído com a formação de vocês de alguma forma.

Agradeço a todos os meus amigos e amigas pelo incentivo e por acreditarem em mim em todos os momentos. Destaco aqui a Lina, a Marcela e a Paolla, que estiveram mais próximas durante a jornada e com elas pude dividir as conquistas e superar as barreiras, dia a dia.

Agradeço também a CAPES, pela concessão da bolsa de estudos, e aos outros órgãos de fomento a pesquisa, a FAPEMIG e ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Agradeço a COOCACER, na pessoa do Rodolfo, e ao Café Ouro Negro, na pessoa da Angélica, pela solicitude em me ajudar a adquirir o café usado para a pesquisa, além de todas as informações repassadas. Agradeço também ao Márcio Gremonesi, por vender e torrar o café utilizado neste estudo.

Obrigada a todos que contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho.

A todos vocês, a minha imensa gratidão!

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	i
LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS .....	v
RESUMO.....	viii
ABSTRACT .....	ix
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1    Objetivos.....	3
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>5</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1    Abordagem Experimental.....	5
2.1.1    Café – caracterização e produção .....	5
2.1.1.1    Processo de beneficiamento do café - secagem e torra .....	7
2.1.2    Tambores Rotatórios.....	8
2.1.2.1    Regimes de Escoamento .....	9
2.2    Abordagem Numérica.....	19
2.2.1    Fluidodinâmica computacional.....	19
2.2.2    Abordagem Lagrangeana .....	20
2.2.2.1    Formulação Numérica .....	22
2.2.2.2    Alguns estudos em Tambores Rotatórios – Metodologia Lagrangeana .....	26
2.2.3    Abordagem Euleriana .....	28
2.2.3.1    Formulação Numérica .....	29
2.2.3.2    Alguns estudos em Tambores Rotatórios – Metodologia Euleriana .....	34
2.2.3.3    Condições de contorno na parede.....	35
2.2.3.3.1    Coeficiente de Especularidade.....	36

2.2.3.4 Malha computacional .....	38
2.2.3.4.1 Malha móvel .....	39
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>40</b>
<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>40</b>
3.1 Materiais e metodologia experimental .....	41
3.1.1 Caracterização do material particulado.....	41
3.1.2 Unidade experimental .....	45
3.1.3 Transição entre os regimes de escoamento.....	46
3.1.4 Perfil de velocidade das partículas e espessura da camada ativa.....	48
3.1.5 Medida do ângulo de repouso dinâmico ( $\theta_s$ ) .....	49
3.2 Metodologia numérica .....	50
3.2.1 Metodologia Euleriana .....	50
3.2.1.1 Confeção da malha computacional .....	50
3.2.1.2 Condições numéricas das simulações eulerianas.....	51
3.2.1.3 Condições de contorno na parede.....	52
3.2.2 Metodologia Numérica Lagrangeana.....	54
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>56</b>
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>56</b>
4.1 Resultados Experimentais .....	56
4.1.1 Caracterização do material .....	56
4.1.2 Transição entre os regimes de escoamento .....	57
4.1.3 Ângulo de repouso dinâmico ( $\theta_s$ ) .....	59
4.1.4 Perfis de velocidade de partículas.....	60
4.1.5 Comparação entre as partículas de café verde e café torrado .....	66
4.2 Resultados de Simulação .....	69
4.2.1 Metodologia Euleriana.....	69

4.2.1.1 Análise das condições de contorno na parede - coeficiente de especularidade .....	69
4.2.1.2 Análise das condições de contorno – não deslizamento.....	73
4.2.2 Metodologia Lagrangeana .....	79
4.2.2.1 Calibração dos parâmetros pelo método DEM.....	79
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>90</b>
<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>90</b>
5.1 Conclusões.....	90
5.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	92
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>94</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Partes componentes do fruto do café (Adaptado de ESQUIVEL e JIMÉNEZ, 2009). .....	6
Figura 2.2: Regimes de escoamento em tambores rotatórios (Adaptado de CHOU e HSIAU, 2012). .....	10
Figura 2.3: Localização das camadas ativa e passiva do regime de rolamento em um tambor rotatório (Adaptado de AISSA <i>et al.</i> , 2012). .....	14
Figura 2.4: Diferentes definições para o regime de centrifugação: a) todas as partículas estão aderidas à parede do tambor; b) apenas a camada mais externa de partículas do leito está aderida à parede do tambor (SANTOS, 2015). .....	17
Figura 2.5: Algoritmo de resolução da metodologia DEM (Adaptado de DEM Solutions, 2005). .....	21
Figura 2.6: Esquema simplificado das forças de contato (Adaptado de MUGURUMA <i>et al.</i> , 2000). .....	24
Figura 3.1: Grãos de café (a) torrado e (b) verde. .....	42
Figura 3.2: Esquema do aparato utilizado para determinar o coeficiente de atrito estático partícula-parede e partícula-partícula (SANTOS, 2015). .....	43
Figura 3.3: Aparato experimental usado para medir o atrito estático partícula-partícula: (a) vista lateral; (b) vista superior – camada de partículas aderida a superfície do plano de inclinação variável. .....	43
Figura 3.4: Aglomerados de partículas de café verde. .....	43
Figura 3.5: Aparato para medida experimental do coeficiente de restituição dos grãos de café. .....	45
Figura 3.6: Equipamento utilizado para realizar ensaios de compressão para o café verde. .....	45
Figura 3.7: Unidade experimental e a câmera de alta velocidade utilizados nos experimentos. .....	46
Figura 3.8: Regimes de escoamento cujas transições foram estudadas. .....	47
Figura 3.9: Leito de partículas em: (a) rolamento; (b) cascadeamento e (c) centrifugação. .....	48
Figura 3.10: Região ativa, região passiva e linha de referência usada na metodologia para calcular os perfis de velocidade das partículas. .....	49

Figura 3.11: Medida experimental do ângulo de repouso dinâmico do leito de grãos de café utilizando-se o software Meazure™ .....	50
Figura 3.12: Vista frontal (a) e lateral (b) da malha computacional utilizada no estudo de simulação numérica Euleriana.....	51
Figura 3.13: (a) <i>Clump</i> de esferas representando o café verde na modelagem DEM (b) grão de café verde.....	54
Figura 4.1: Curvas de transição das partículas de café (verde e torrado) para os regimes de escoamento estudados.....	57
Figura 4.2: Ângulo de repouso dinâmico das partículas de café verde (a) e torrado (b).....	60
Figura 4.3: Perfil de velocidade dos grãos de café verde para as velocidade de rotação do tambor: (a) 12 rpm; (b) 13 rpm; (c) 16 rpm; (d) 18 rpm. ....	62
Figura 4.4: Perfil de velocidade dos grãos de café torrado para a velocidade de rotação do tambor igual a 15,5 RPM e os enchimentos: (a) 10%; (b) 20%; (c) 30 %; (d) 40 %; (e) 50%.64	
Figura 4.5: Variação da espessura da camada ativa com a velocidade de rotação do tambor e com o grau de enchimento para: (a) café verde; (b) café torrado.....	66
Figura 4.6: Comparação da espessura da camada ativa entre o café verde e o café torrado para os enchimentos: (a) 10%; (b) 20%; (c) 30 %; (d) 40 %; (e) 50%.....	67
Figura 4.7: Frações volumétricas de sólidos observadas experimental e numericamente para diferentes valores de coeficiente de especularidade durante o regime de rolamento (12,5 rpm). ....	70
Figura 4.8: Perfil de velocidade das partículas de café verde experimental e simulado para os diferentes valores de coeficiente de especularidade testados com graus de enchimento de: (a) 20% e (b) 40%. ....	72
Figura 4.9: Frações volumétricas de sólidos observadas experimental e numericamente para a condição de contorno “ <i>no slip</i> ” (12,5 rpm). ....	74
Figura 4.10: Perfil de velocidade das partículas de café verde experimental e simulado para a condição de contorno de não deslizamento ( <i>no slip</i> ) testados com graus de enchimento de: (a) 10% ; (b) 30% e (c) 50%. ....	75
Figura 4.11: Frações volumétricas de sólidos observadas experimental e numericamente para a condição de contorno “ <i>no slip</i> ” e modelo de viscosidade friccional (12,5 rpm).....	77
Figura 4.12: Perfil de velocidade das partículas de café verde experimental e simulado para a condição de contorno de não deslizamento ( <i>no slip</i> ) e modelo de viscosidade friccional testados com graus de enchimento de: (a) 10% ; (b) 20%, (c) 30%, (d) 40% e (e) 50%. ....	78

Figura 4.13: Plano frontal do tambor experimental e resultado das simulações 5, 6, 10, 13, 14 e 21. ....	84
Figura 4.14: Perfis de velocidade das partículas de café verde experimental e das simulações 5, 6, 10, 13, 14 e 21. ....	86
Figura 4.15: Perfis de velocidade das partículas de café verde experimental e das simulações 18 e 23. ....	87
Figura 4.16: Comparação dos perfis de velocidade de partículas experimental, dados da simulação 18 e dados da simulação 20. ....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Classificação dos regimes de escoamento em um tambor rotatório (Adaptado de Mellmann, 2001). .....	11
Tabela 3.1: Métodos numéricos aplicados nas simulações em CFD.....	52
Tabela 3.2: Condições operacionais das simulações para os diferentes valores de coeficientes de especuaridade testados. ....	53
Tabela 3.3: Condições e parâmetros empregados na simulação Lagrangeana.....	55
Tabela 4.1: Propriedades físicas do café verde e do café torrado.....	56
Tabela 4.2: Variação da espessura da camada ativa com o enchimento e velocidade de rotação do tambor para o café verde. ....	63
Tabela 4.3: Variação da espessura da camada ativa com o enchimento e velocidade de rotação do tambor para o café torrado.....	65
Tabela 4.4: Variação percentual da espessura da camada ativa entre os valores para o café verde e o café torrado. ....	68
Tabela 4.5: Valores experimentais para o coeficiente de atrito estático para partícula individual e em agrupamentos. ....	80
Tabela 4.6: Matriz do PCC para as simulações Lagrangeanas.....	81
Tabela 4.7: Ângulo de repouso dinâmico medido para as simulações do PCC (plano frontal e do meio) e comparação com dado experimental. ....	82

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	área projetada da partícula no CAMSIZER [ $M^0L^2T^0$ ]
$AE_{pp}$	coeficiente de atrito estático partícula-partícula [-]
$AE_{pw}$	coeficiente de atrito estático partícula-parede [-]
$AE_{pw,c}$	coeficiente de atrito estático partícula-parede crítico [-]
$AR_{pp}$	coeficiente de atrito de rolamento partícula-partícula [-]
$AR_{pw}$	coeficiente de atrito de rolamento partícula-parede[-]
$c_n$	coeficiente normal de amortecimento [ $M^1L^0T^{-2}$ ]
$c_t$	coeficiente tangencial de amortecimento [ $M^1L^0T^{-2}$ ]
$D$	diâmetro do tambor rotatório [ $M^0L^1T^0$ ]
$d$	diâmetro da partícula [ $M^1L^0T^0$ ]
$d_s$	diâmetro da partícula da fase s [ $M^1L^0T^0$ ]
$d_{50}$	diâmetro médio das partículas [ $M^1L^0T^0$ ]
$E^*$	módulo de Young [ $M^1L^{-1}T^{-2}$ ]
$e_{ss}$	coeficiente de restituição [-]
$f$	nível de enchimento do tambor [-]
$F_{c,ij}$	força de contato entre as partículas i e j [ $M^1L^1T^{-2}$ ]
$F_{c,n,ij}$	força de contato normal entre as partículas i e j [ $M^1L^1T^{-2}$ ]
$F_{c,t,ij}$	força de contato tangencial entre as partículas i e j [ $M^1L^1T^{-2}$ ]
$F_n^E$	força normal (modelo de Hertz-Mindlin) [ $M^1L^1T^{-2}$ ]
$F_t$	força tangencial (modelo de Hertz-Mindlin) [ $M^1L^1T^{-2}$ ]
$F_r$	número de Froude [-]
$g$	aceleração da gravidade [ $M^0L^1T^{-2}$ ]
$G^*$	módulo de cisalhamento [ $M^1L^{-1}T^{-2}$ ]
$g_{0,ss}$	função de distribuição radial [-]
$I$	momento de inércia da partícula [ $M^1L^2T^0$ ]
$\bar{I}_{2D}$	segundo invariante do tensor taxa de deformação [ $M^0L^0T^{-2}$ ]
$K_n$	coeficiente normal de rigidez [ $M^1L^0T^{-2}$ ]
$K_{sf}$	coeficiente de troca de momento entre as fases [ $M^1L^0T^{-1}$ ]
$k_t$	coeficiente tangencial de rigidez [ $M^1L^0T^{-2}$ ]

$L$	comprimento do tambor [ $M^0L^1T^0$ ]
$m_i$	massa da partícula $i$ [ $M^1L^0T^0$ ]
$m$	massa de sólidos [ $M^1L^0T^0$ ]
$n_{ij}$	vetor normal unitário [-]
$P$	pressão [ $M^1L^{-1}T^{-2}$ ]
$Pe$	perímetro da partícula dado pelo CAMSIZER [ $M^0L^1T^0$ ]
$P_s$	pressão de sólidos [ $M^1L^{-1}T^{-2}$ ]
$R$	raio do tambor rotatório [ $M^0L^1T^0$ ]
$R_{ij}^*$	raio equivalente das partículas $i$ e $j$ em contato [ $M^0L^1T^0$ ]
$R_i$	distância entre o centro de massa da partícula até o ponto de contato na superfície [ $M^0L^1T^0$ ]
$r_p$	vetor posição da partícula [ $M^0L^1T^0$ ]
$r_i$	raio da partícula $i$ [ $M^0L^1T^0$ ]
$T$	temperatura [-]
$\bar{\bar{T}}_f$	tensor tensão da fase fluida [ $M^1L^{-1}T^{-2}$ ]
$\bar{\bar{T}}_s$	tensor tensão da fase sólida [ $M^1L^{-1}T^{-2}$ ]
$t$	tempo [ $M^0L^0T^1$ ]
$U$	umidade em base seca [-]
$u$	vetor velocidade linear da partícula [ $M^0L^1T^{-1}$ ]
$u_{p,w}$	velocidade tangencial da fase sólida na parede [ $M^0L^1T^{-1}$ ]
$v_f$	velocidade da fase fluida [ $M^0L^1T^{-1}$ ]
$v_s$	velocidade da fase sólida [ $M^0L^1T^{-1}$ ]

### Símbolos gregos

$\alpha_f$	fração volumétrica da fase fluida [-]
$\alpha_s$	fração volumétrica da fase sólida [-]
$\alpha_{s,max}$	limite máximo de empacotamento [-]
$\beta$	ângulo de inclinação para a medida do coeficiente de atrito estático partícula-parede e partícula-partícula [-]

$\delta_{n,ij}$	sobreposição normal das partículas i e j [ $M^0L^1T^0$ ]
$\delta_{t,ij}$	sobreposição tangencial das partículas i e j [ $M^0L^1T^0$ ]
$\varepsilon$	porosidade do leito de material [-]
$\theta$	temperatura granular [-]
$\theta_s$	ângulo de repouso dinâmico do material no regime de rolamento [-]
$\lambda_s$	viscosidade granular <i>bulk</i> [ $M^1L^{-1}T^{-1}$ ]
$\mu$	coeficiente de atrito entre dois materiais [-]
$\mu_s$	viscosidade granular cisalhante [ $M^1L^{-1}T^{-1}$ ]
$\mu_{s,col}$	viscosidade granular colisional [ $M^1L^{-1}T^{-1}$ ]
$\mu_{s,cin}$	viscosidade granular cinética [ $M^1L^{-1}T^{-1}$ ]
$\mu_{s,fric}$	viscosidade granular friccional [ $M^1L^{-1}T^{-1}$ ]
$\mu_p$	viscosidade dinâmica do sólido [ $M^1L^{-1}T^{-1}$ ]
$\rho_f$	densidade da fase fluida [ $M^1L^{-3}T^0$ ]
$\rho_s$	densidade da fase sólida [ $M^1L^{-3}T^0$ ]
$\tau_c$	tensão cisalhante de Marangoni [ $M^1L^{-1}T^{-2}$ ]
$\tau_i$	torque aplicado pela partícula sobre a superfície de contato [ $M^1L^2T^{-2}$ ]
$\varphi$	coeficiente de especularidade [-]
$\phi_e$	ângulo de repouso estático do material [-]
$\omega$	velocidade angular de rotação do tambor [ $M^0L^0T^{-1}$ ]
$\omega_c$	velocidade angular crítica de rotação do tambor [ $M^0L^0T^{-1}$ ]
$\omega_i$	vetor unitário de velocidade angular da partícula no ponto de contato com a superfície [-]
$\phi$	esfericidade [-]

#### Subscritos

$s$	fase sólida
$f$	fase fluida

## RESUMO

O estudo da dinâmica de partículas no interior de um tambor rotatório é de grande importância devido à ampla aplicação deste equipamento em diferentes setores industriais. Na produção de café, nas etapas de secagem e torra, são utilizados tambores rotatórios. Considerando o fato de que o Brasil é o maior produtor e exportador de café do mundo, melhorar a eficiência de funcionamento destes equipamentos é de grande relevância. Dessa forma, o presente trabalho desenvolveu um estudo experimental e numérico sobre a dinâmica de grãos de café, nas condições verde e torrado, no escoamento em um tambor rotatório. Experimentalmente, avaliou-se, para ambos os cafés verde e torrado, as transições entre os regimes de rolamento, cascadeamento, catarateamento e centrifugação, utilizando-se uma técnica de análise de imagens. A diferença de densidades das partículas nos dois casos influenciou de maneira significativa a transição catarateamento-centrifugação. Uma análise mais aprofundada foi feita em relação ao regime de rolamento, para o qual se avaliou os perfis de velocidade das partículas em estudo e também a espessura da camada ativa para diferentes níveis de enchimento e velocidades de rotação do tambor. Tal espessura mostrou-se dependente de ambas as variáveis. Encontrou-se uma grande similaridade no comportamento da região ativa para os grãos de café antes e depois do processo de torra, considerando-se o grau de enchimento do cilindro constante. Em relação ao estudo numérico, foram empregadas duas metodologias: Lagrangeana e Euleriana. Na abordagem Euleriana foram testadas duas condições de contorno na parede (coeficientes de especularidade e não deslizamento) e o modelo com a condição de contorno de não deslizamento acoplado à viscosidade friccional mostrou-se eficiente em prever o comportamento dos grãos de café verde em relação aos perfis de velocidade no regime de rolamento. Quanto à abordagem Lagrangeana, realizou-se uma calibração para os coeficientes de atritos de rolamento e estático partícula-partícula e partícula-parede. Estes parâmetros foram avaliados em um Planejamento Composto Central e também foi possível encontrar a melhor combinação entre eles capaz de reproduzir o comportamento dos grãos verdes para os perfis de velocidade.

Palavras-chave: tambor rotatório, café, abordagem Euleriana, abordagem Lagrangeana, perfis de velocidade, regimes de escoamento, CFD, DEM.

## ABSTRACT

The study of particle dynamics inside a rotating drum is extremely important due to the wide range of application for this equipment in different industrial sectors. In order to produce coffee, in the drying and roasting stages, rotary drums are used. Considering the fact that Brazil is the largest producer and exporter of coffee in the world, improving the efficiency of these equipments has great relevance. Thus, the present work developed an experimental and numerical study about the dynamics of coffee beans, under green and roasted conditions, inside a rotating drum. Experimentally, for both green and roasted coffees, the transitions between rolling, cascating, cataracting and centrifuging regimes were evaluated using an image analysis technique. The different density values in both conditions, green and roasted, significantly influenced the cataract-centrifuging transition. Further analyses were made regarding the rolling regime: velocity profiles of the particles were evaluated as well as the thickness of the active layer for different filling degrees and rotation speeds of the drum. This thickness was observed as dependent on both variables. It was found great similarity between the behavior of the active region for coffee beans before and after the roasting process, considering a constant filling level. About the numerical study, two methodologies were employed: Lagrangian and Eulerian. For the Eulerian approach, two boundary conditions on the wall were tested (specularity coefficient and no-slip ) and the model with non-slip condition coupled with frictional viscosity parameter proved to be an efficient model predicting the velocity profiles for green coffee beans in the rolling regime. As for the Lagrangean approach, a calibration was performed involving the coefficients of rolling and static friction (particle-particle and particle-wall). These parameters were evaluated using a Central Composite Experimental Design and it was also possible to find the best combination between them, capable of reproducing the behavior of the green grains for particle velocity profiles.

Key words: rotating drum, coffee, Eulerian approach, Lagrangean approach, velocity profile, particle flow regime, CFD, DEM.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor e também um dos maiores consumidores de café do mundo. A produção nacional do café impacta mundialmente as transações comerciais deste produto (EMBRAPA, 2015).

O fruto é produzido em quatro continentes, sendo que as regiões que apresentam a maior projeção mundial se encontram na América do Sul, África, Ásia e América Central. Além do Brasil, outros países que também se destacam como produtores são Colômbia, Indonésia, Vietnã, Costa do Marfim e Uganda (THOMAZIELLO, 2013).

Internamente, o café desempenha um papel de grande importância no cenário econômico, político, social e ambiental no Brasil. As somas obtidas pelas exportações do produto são representativas para a economia nacional. Pesquisas realizadas pela Associação Brasileira da Indústria de Café (ABIC) no ano de 2016 mostram que o café é consumido em 98,2 % dos lares brasileiros e seu consumo tem crescido nos últimos anos, estimulado pelos avanços em termos de qualidade dos produtos.

Apesar do elevado número de pesquisas destinadas à melhoria da qualidade dos grãos de café in natura, poucos estudos são destinados à análise dos efeitos das etapas de secagem, torrefação e moagem de grãos de café na qualidade do produto final. Além disso, alguns estudos são desenvolvidos de forma empírica, desprovidos de base científica mais elaborada.

Melhorias, sobretudo nos processos industriais de secagem e torrefação tem grande relevância para o país, uma vez que o café de maior qualidade produzido nacionalmente é enviado para ser torrado em outros países, principalmente localizados no continente europeu e na América do Norte, em vez de ser beneficiado no Brasil.

Durante o beneficiamento dos grãos de café, nas etapas de secagem e torrefação utilizam-se tambores rotatórios. Esses equipamentos são empregados em diversos outros processos industriais, operando como misturadores, granuladores e reatores, por exemplo.

Conforme apresentado por Mellmann (2001), o desempenho dos tambores rotatórios depende de uma série de parâmetros de projeto e condições de operação. O comportamento dos materiais granulares no interior destes equipamentos é bastante complexo e ainda não foi totalmente compreendido.

Para possibilitar a otimização dos equipamentos que empregam tambores rotatórios é preciso compreender a dinâmica do material em seu interior, de maneira especial os regimes de escoamento que podem surgir na seção transversal, sendo eles: deslizamento, avalanche, rolamento, cascadeamento, catarateamento e centrifugação. É necessário conhecê-los e compreender suas propriedades e mecanismos de atuação, para que seja possível definir qual a faixa ideal de operação dos equipamentos em questão.

Neste sentido, o estudo da fluidodinâmica por meio da simulação computacional apresenta-se como uma ferramenta de grande utilidade. O uso da fluidodinâmica computacional (CFD) permite a abordagem de modelos matemáticos para a compreensão de fenômenos físicos.

As simulações computacionais são úteis quando existem dificuldades para a realização de medidas experimentais e apresentam menores custos em simular diferentes configurações de um equipamento, além de processarem uma grande quantidade de informações em alta velocidade. Por tal razão, juntamente aos trabalhos experimentais, existe uma grande vantagem em desenvolver também um trabalho computacional para complementar a informação experimental, uma vez que as simulações possibilitam a obtenção de informações em qualquer ponto do processo em estudo e isto nem sempre é possível ao utilizar-se um aparato experimental (PATANKAR, 1980; MACHADO, 2016).

Existem duas abordagens numéricas que podem ser empregadas para estudar a dinâmica dos materiais particulados, sendo elas: abordagem Euleriana e Lagrangeana.

Na aproximação Euleriana, as fases sólida e fluida são tratadas como meios contínuos e interpenetrantes. Para esta abordagem as equações diferenciais de conservação e as equações constitutivas são resolvidas para um volume de controle ocupado por ambas as fases. A aproximação Euleriana tem vasta aplicação em relação à dinâmica, mistura e segregação de partículas no interior de tambores rotatórios: He *et al.*, 2007; Demagh *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2013; Delele *et al.*, 2016.

Já a abordagem Lagrangeana acompanha o movimento de partículas individuais e aplica um balanço de força em cada uma delas ao longo do tempo. Essa aproximação leva em consideração as interações partícula-partícula e partícula-parede através das leis de contato. Dessa forma, a abordagem Lagrangeana permite analisar individualmente o posicionamento, a velocidade e as forças de contato que atuam sobre cada partícula e por isso exige um esforço computacional maior que a abordagem Euleriana. Apesar de sua aplicação ser impossibilitada na simulação de equipamentos industriais com grandes dimensões, existem trabalhos referentes ao comportamento e deslocamento de sólidos no interior de tambores rotatórios que empregaram essa metodologia: Yamane *et al.*, 1998; Kwapinska *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2013.

Sendo assim, esse trabalho tem o objetivo de estudar a dinâmica de grãos de café em tambores rotatórios, uma vez que os equipamentos relevantes utilizados para produzir o café para consumo apresentam essa configuração. Visando compreender melhor o comportamento destas partículas dentro dos cilindros rotatórios, o trabalho também desenvolverá estudos numéricos envolvendo tanto a abordagem Euleriana quanto a Lagrangeana.

## **1.1 Objetivos**

Dadas as informações expostas anteriormente, este trabalho tem como objetivo geral estudar, por meio de técnicas experimentais e numéricas, os principais mecanismos referentes à dinâmica de grãos de café verde e também torrados no interior de um tambor rotatório. Dessa forma, os objetivos específicos do trabalho são:

- Investigar experimentalmente os regimes de rolamento, cascataeamento, catarateamento e centrifugação para partículas de café verde e torrado no tambor rotatório e determinar a influência da velocidade de rotação e do grau de enchimento do equipamento sobre as transições entre eles;
- Modelar numericamente e simular os principais mecanismos referentes ao escoamento do material em estudo no regime de rolamento, empregando a abordagem Euleriana e avaliando diferentes condições de contorno na parede;
- Utilizar a metodologia Lagrangeana para realizar uma calibração de parâmetros relevantes ao escoamento de partículas de café em tambores rotatórios por meio de um Planejamento Composto Central.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo está dividido em duas abordagens: experimental (seção 2.1) e numérica (2.2). A abordagem experimental apresenta aspectos relevantes da caracterização e produção do café, bem como a descrição da dinâmica de materiais particulados em tambores rotatórios, que são equipamentos utilizados nas etapas principais de beneficiamento do café. Já a seção numérica aborda as metodologias de simulação empregadas em estudos sobre o comportamento de partículas em tambores.

#### **2.1 Abordagem Experimental**

##### **2.1.1 Café – caracterização e produção**

O café é uma das bebidas mais populares e consumidas no mundo todo. Trata-se de uma das principais commodities na economia mundial, envolvendo vinte e cinco milhões de agricultores e trabalhadores em mais de cinquenta países ao redor do mundo (Global Exchange, 2014).

De acordo com o MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, o Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, e segundo maior consumidor do produto, apresentando, atualmente, um parque cafeeiro estimado em 2,256 milhões de hectares. No período de janeiro a dezembro de 2014, o café representou 6,9% das exportações, que chegaram a 36,73 milhões de sacas de 60 kg, gerando uma receita de US\$ 6,66 bilhões e ocupando a 5ª posição no ranking de exportações do agronegócio brasileiro. Referente à produção nacional de grãos, dois estados brasileiros se destacam: Minas Gerais, que é responsável por 51,59% da produção de café do país; e o Espírito Santo, correspondendo a 24,76% da produção nacional (CONAB, 2015).

Os principais destinos do café verde brasileiro são Alemanha e Estados Unidos, os quais representam, conjuntamente, 38,75% das exportações nacionais totais de café. O Brasil é o principal fornecedor de café ao mercado germânico, sendo responsável por fornecer 30% do café importado pelo país. No ano de 2014, a Alemanha importou do Brasil 6,3 milhões de sacas de café verde por um valor de 1,19 bilhões de dólares. No mesmo período, exportou 3,37 milhões de sacas de 60 kg de café torrado, gerando uma receita de US\$ 1,25 bilhões (ICO, 2014; UN COMTRADE, 2015).

Os dados do relatório sobre o mercado de café divulgado pela OIC – Organização Internacional do Café – em junho de 2016 mostram que foram produzidas 144,8 milhões de sacas de café em 2015 e que o consumo mundial foi de 152,1 milhões de sacas neste mesmo ano. O consumo brasileiro foi de 20,5 milhões de sacas, o que representa 13,48% do total consumido mundialmente (EMBRAPA, 2016).

O café pertence à família *Rubiaceae* e ao gênero *Coffea*. As partes componentes do fruto do cafeeiro estão ilustradas na Figura 2.1. O fruto do café possui externamente uma casca resistente e lisa denominada de pericarpo, geralmente verde em frutos verdes, mas que se torna vermelho-violeta ou vermelho-escuro quando maduro. O pericarpo recobre a polpa amarelada, que é macia, fibrosa e doce, também chamada de mesocarpo exterior. Em sequência tem-se uma camada translúcida, incolor, fina, viscosa e altamente hidratada de mucilagem, denominada camada de pectina. Em seguida, há um fino endocarpo de cor amarelada, também chamado de pergaminho. Finalmente, a película prateada recobre cada hemisfério do grão de café, o endosperma (PURSEGLOVE, 1974; BERBERT *et al.*, 2001; BELITZ *et al.*, 2009).

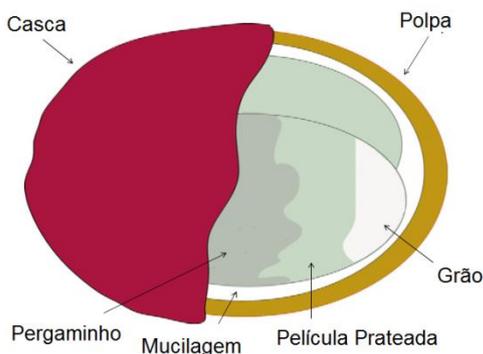


Figura 2.1: Partes componentes do fruto do café (Adaptado de ESQUIVEL e JIMÉNEZ, 2009).

### **2.1.1.1 Processo de beneficiamento do café - secagem e torra**

Para garantir um café de qualidade elevada, são necessários cuidados especiais nas fases de pré-colheita, colheita e pós-colheita, pois diversos fatores podem causar mudanças que influenciam as características do produto final (OLIVEIRA *et al.*, 2009; TOLEDO *et al.*, 2016).

Durante o processo de beneficiamento do café tem-se, dentre outras, as etapas de secagem e torrefação. Ambas as operações apresentam transferência de massa e calor e são de grande importância durante o processamento do produto. Na indústria, o tambor rotatório é o equipamento mais comumente empregado para secagem e torrefação em processos contínuos ou mesmo para operações em batelada.

Os frutos de café são colhidos em diferentes conteúdos de umidade, variando de 50 a 70% (base úmida) para maduros (cerejas); 35 a 50% para frutos “passa”; e 16 a 30% para frutos secos no cafeeiro. Ao final da secagem o conteúdo de umidade deve ser de 12% (base úmida), para evitar a fermentação e o crescimento de mofo nos grãos e subsequente produção de microtoxinas (PALÁCIOS-CABRERA *et al.*, 2004).

Utilizam-se basicamente dois métodos para secagem de frutos de café: secagem natural em terreiros ou secagem artificial utilizando secadores mecânicos. No terreiro, o desenvolvimento de micro-organismos na superfície dos frutos e o aumento da respiração e da temperatura do produto são fatores que aceleram o processo de fermentação. Apesar desses riscos, pequenos e médios produtores utilizam intensamente os terreiros como única etapa na secagem do café (SILVA, 2000).

A secagem em secadores mecânicos é feita mais rapidamente do que ao sol e tem viabilidade mesmo em períodos chuvosos e em regiões úmidas. Além disso, evita interferências climáticas na qualidade do café; reduz a área de terreiros e diminui a mão de obra necessária. As desvantagens são: maior investimento em equipamentos e custo adicional de energia ou lenha (MATIELLO, 1991).

A torrefação, etapa posterior à secagem, consiste em um intenso tratamento térmico, durante o qual os grãos de café são aquecidos a altas temperaturas, entre 160 e 240 °C. Sua duração normalmente varia entre oito e vinte minutos, dependendo das características desejadas para o produto final (FABBRI *et al.*, 2011).

Esta etapa envolve complexos mecanismos de transferência de energia e de massa. Tanto a transferência de calor do equipamento de torra para os grãos quanto a transferência de massa dos componentes voláteis e de vapor de água que migram das partículas para o ambiente alteram as características dos grãos de café em termos de peso, densidade, conteúdo de umidade, cor e sabor. Durante o processo, ocorrem reações de oxidação, redução, hidrólise, polimerização, descarboxilação e várias outras alterações químicas (ORTOLÁ *et al.*, 1998; BOTAZZI *et al.*, 2001).

É possível perceber a importância dos processos de secagem e torra na produção do café, que é um produto de destaque para a economia do Brasil. Assim, desenvolver um maior entendimento a respeito de quais as variáveis operacionais e características do material se relacionam com a sua dinâmica e são relevantes para estes processos é necessário para se otimizar o funcionamento dos equipamentos responsáveis por tais etapas. Estes equipamentos, os tambores rotatórios, serão apresentados a seguir.

### **2.1.2 Tambores Rotatórios**

Os tambores rotatórios são, geralmente, cilindros simples que giram em torno de seu eixo central de modo a movimentar o material em seu interior. Esses equipamentos são amplamente utilizados para o processamento de materiais granulares nas indústrias mineral, farmacêutica, de cerâmica, de cimento e de alimentos, nas quais são utilizados para realizar secagem, aquecimento, resfriamento, moagem, granulação, recobrimento, reações químicas, mistura e segregação, dentre outras aplicações (CHOU e HSIAU, 2012).

Sabe-se que os tambores rotatórios possuem uma ampla aplicação em diferentes setores industriais. Apesar dos desafios decorrentes do desenvolvimento de tecnologias mais novas e mais especializadas, como os leitos fluidizados, os tambores continuam a encontrar novas aplicações, graças a sua fácil utilização. 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. Além da possibilidade de operar com grandes quantidades de material (elevada capacidade).

Embora os tambores possam ser operados com certa facilidade, a dinâmica das partículas com as quais estes equipamentos operam é relativamente complexa. Assim, para melhorar o desempenho dos tambores rotatórios é necessário uma melhor compreensão dos fenômenos de transporte envolvendo o material granular no interior dos mesmos. Devido a sua movimentação, partículas sólidas no interior do cilindro podem estar envolvidas em vários processos como secagem, aquecimento e reação química, dentre outros. Por isso é essencial ter uma compreensão sobre os fundamentos destes processos, de modo que ele possa ser projetado visando às condições ótimas de funcionamento (HEMA, 2003).

De acordo com Mellmann (2001), o movimento dos sólidos no interior destes cilindros é função de certas variáveis operacionais e de elementos no interior dos tambores. Dentre estas variáveis podem-se citar as características da partícula como esfericidade, diâmetro, coesão, densidade e propriedades friccionais (atrito partícula-partícula e partícula-parede); bem como o raio interno do cilindro e seu grau de enchimento. Dependendo da combinação de tais variáveis podem surgir no interior dos tambores rotatórios diferentes regimes de escoamento.

### **2.1.2.1 Regimes de Escoamento**

A movimentação dos sólidos em tambores rotatórios pode se dar nas direções axial e radial. O fluxo radial das partículas é causado pela rotação do tambor, enquanto o fluxo axial é influenciado pela altura do leito e pela inclinação do tambor. Como a velocidade das partículas no plano transversal é maior, as taxas de transferência de calor e massa, de mistura e os processos de reação são controlados pelo fluxo transversal das partículas (BOATENG E BARR, 1997; MELLMAN, 2001).

Assim, o comportamento granular em um tambor rotatório pode ser identificado por diferentes regimes de fluxo radial baseados no movimento das partículas. A depender das variáveis citadas anteriormente, podem surgir no interior dos tambores os seguintes regimes: escorregamento ou deslizamento, caimento ou “avalanche”, rolamento, cascadeamento, catarateamento e centrifugação. A Figura 2.2 a seguir apresenta esquemas ilustrativos destes regimes.

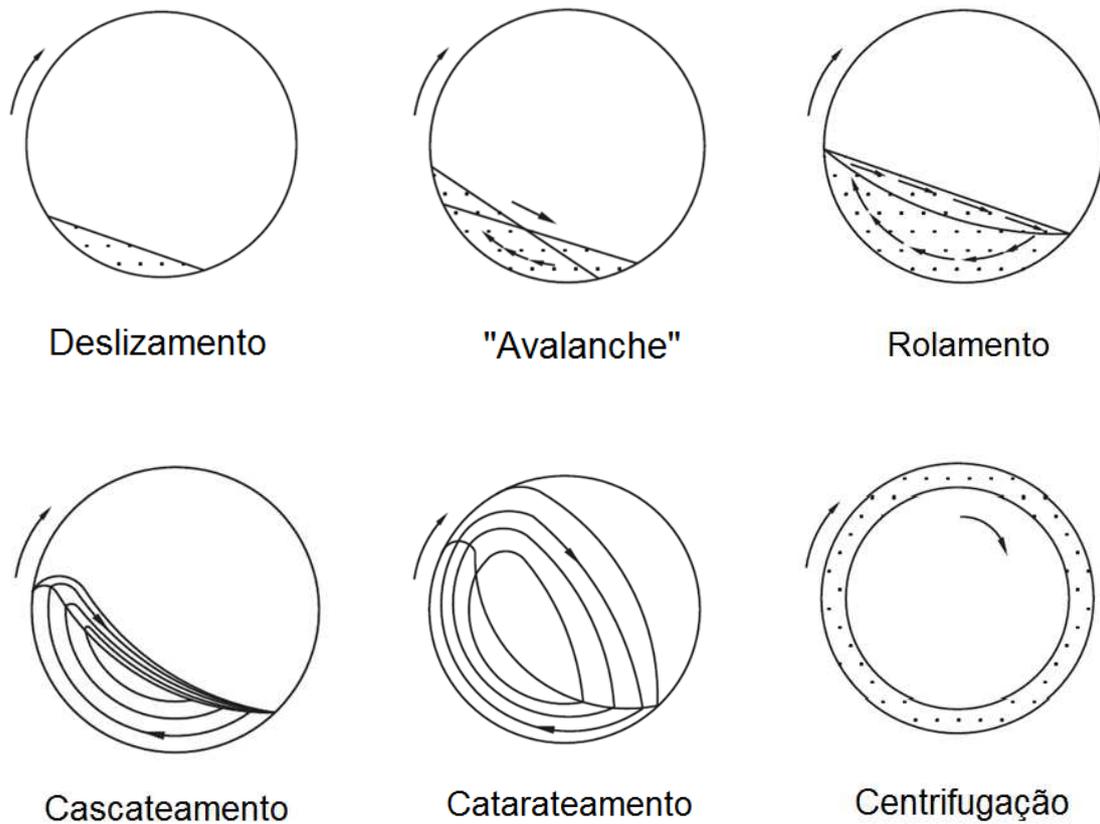


Figura 2.2: Regimes de escoamento em tambores rotatórios (Adaptado de CHOU e HSIAU, 2012).

Para partículas esféricas, Mellmann (2001) classificou os regimes de escoamento como uma função do grau de enchimento do tambor ( $f$ ) e do valor do número de Froude ( $Fr$ ), que representa a relação entre as forças centrífuga e gravitacional. O adimensional é dado pela Equação 2.1, na qual  $\omega$  representa a velocidade angular de rotação do tambor,  $R$  é o raio do tambor e  $g$ , o valor da aceleração gravitacional.

$$Fr = \frac{\omega^2 R}{g} \quad (2.1)$$

A Tabela 2.1 contém as faixas de valores que foram identificadas pelo autor referente ao número de Froude para as transições entre os regimes de escoamento, levando em conta sua aplicação industrial e o grau de enchimento do tambor.

Tabela 2.1: Classificação dos regimes de escoamento em um tambor rotatório (Adaptado de Mellmann, 2001).

Regime	Faixa de Número de Froude	Grau de Enchimento	Condição de Atrito na Parede	Aplicação Industrial
<b>Deslizamento</b>	$0 < F_r < 10^{-4}$	$f < 0,1$	$AE_{pw} < AE_{pw,c}$	-
<b>Avalanche</b>	$10^{-5} < F_r < 10^{-3}$		$AE_{pw} > AE_{pw,c}$	Fornos rotatórios, reatores, secadores, resfriadores, misturadores
<b>Rolamento</b>	$10^{-4} < F_r < 10^{-2}$	$f > 0,1$		Moinhos de bola
<b>Cascadeamento</b>	$10^{-3} < F_r < 0,1$			
<b>Catarateamento</b>	$0,1 < F_r < 1$	$f > 0,2$		
<b>Centrifugação</b>	$F_r \geq 1$			

No entanto, segundo o autor, essas faixas servem somente de orientação quanto à transição entre os regimes, uma vez que dependem também das propriedades físicas do material utilizado. Isso já havia sido citado por Henein *et al.* (1983) e estes autores constataram que embora o número de Froude e o grau de enchimento do tambor tenham sido propostos para descrever as transições entre estes regimes, espera-se que outros fatores, tais como as propriedades reológicas das partículas e as propriedades físicas da parede do tambor também exerçam certa influência nas transições.

Os regimes de caimento, rolamento e cascadeamento, são os regimes de escoamento mais utilizados em processos industriais, como por exemplo, granulação, mistura, secagem e recobrimento, enquanto que o regime de catarateamento é, principalmente, empregado nos processos de moagem. Por outro lado, os regimes de escorregamento e centrifugação não são utilizados em nenhum processo industrial e devem ser evitados (MELLMANN, 2001).

Cada um dos regimes ilustrados na Figura 2.2 serão apresentados a seguir.

- Regime de Deslizamento

No caso de tambores com parede lisa e baixas velocidades de rotação, podem surgir os regimes de deslizamento e “avalanche”.

Quando a velocidade de rotação do tambor é muito baixa, principalmente quando o atrito entre a parede do cilindro e as partículas é baixo, o leito dentro do equipamento se comporta como um corpo rígido, caracterizando o regime de deslizamento. Segundo Aissa *et al.* (2012), este regime ocorre mais frequentemente para baixos carregamentos do tambor.

O deslizamento caracteriza-se, assim, pela formação de um leito estático de material que desliza sobre a parede do cilindro. No regime de deslizamento não há mistura entre as partículas. Para melhorar a mistura entre o material sólido para equipamentos operando neste regime, pode-se incluir suspensores no design das paredes internas do tambor (HEMA, 2003; AISSA *et al.*, 2012).

- Regime de “Avalanche” ou Caimento

Em velocidades de rotação do tambor um pouco maiores, atinge-se o regime de caimento, também chamado de “avalanche”. Neste regime, as partículas comportam-se igualmente como um corpo rígido e são transportadas pela parede do cilindro de tal modo que a inclinação da superfície do leito aumenta continuamente até atingir um ângulo superior de repouso. Em sequência, as partículas na parte superior do leito, caem como uma “avalanche” em direção à parte inferior do leito. Após a avalanche, o ângulo de repouso inferior torna-se menor que o ângulo de repouso estático do sólido granular (HEMA, 2003).

Mellmann (2001) descreveu de maneira mais detalhada o regime de avalanche e a caracterização dos ângulos de repouso superior e inferior presentes no mesmo. Segundo as suas observações, durante a rotação do cilindro, a tensão de cisalhamento no interior do leito inclinado aumenta e atinge um valor crítico para um determinado ângulo de inclinação do leito, o chamado ângulo de repouso superior. Próximo à superfície do leito, forma-se um plano de deslizamento, sobre o qual uma fina camada de partículas começa a rolar. O deslocamento das partículas e o transporte de sólidos causados por este movimento ocorrem mais rapidamente do que a reposição de partículas para esta posição, que é gerada pela rotação do cilindro. Como resultado, um deslocamento temporário do plano de deslizamento ocorre, diminuindo o seu

ângulo de inclinação. O processo de “avalanche” termina quando o ângulo de inclinação do plano de deslizamento atinge um valor igual ao ângulo de repouso inferior.

Diferentemente do deslizamento, no regime de caimento observa-se certa mistura devido às constantes “avalanches” do material após atingir um ângulo superior de repouso crítico. A frequência de queda do material, ou as chamadas “avalanches”, é dependente da velocidade de rotação do tambor e do seu diâmetro, assim como do tamanho da partícula. Como descrito por Hema (2003), tal frequência eleva-se com o aumento da velocidade de rotação, conduzindo eventualmente ao regime de rolamento.

Donatelli *et al.* (2015) desenvolveram uma abordagem teórica para compreender melhor a dinâmica de uma quantidade conhecida de material granular ao ser descarregada de um forno rotativo inclinado, uma vez que a distribuição de tamanho das partículas é conhecida e opera-se em regime de avalanche. Os autores notaram que, devido aos diferentes diâmetros de partícula presentes no forno, ocorre segregação axial no regime de avalanche.

- Regime de Rolamento

À medida que a velocidade de rotação do tambor aumenta, ocorre a transição para o regime de rolamento. Este regime apresenta uma superfície de leito plana com uma inclinação constante, caracterizando o ângulo de repouso dinâmico do material ( $\theta_s$ ).

De acordo com Blumberg e Schlünder (1996), o ângulo de repouso dinâmico dos sólidos depende da velocidade de rotação e do grau de enchimento do tambor. Tal propriedade é também uma indicação da facilidade de escoamento de sólidos granulares: quanto menor for o ângulo dinâmico de repouso, mais facilmente se deslocará o leito de partículas.

No regime de rolamento, o leito do material pode ser dividido em duas zonas distintas como apresentado pela Figura 2.3, sendo elas: a região passiva onde as partículas são arrastadas para cima pela parede do tambor; e a região ativa, relativamente fina, na qual as partículas rolam 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 (DING *et al.*, 2001).

Conforme citado por Mellmann (2001), este regime produz um bom grau de mistura de maneira uniforme. Entretanto, quando existe uma distribuição de tamanho de partículas muito ampla, pode-se ter um processo de segregação.

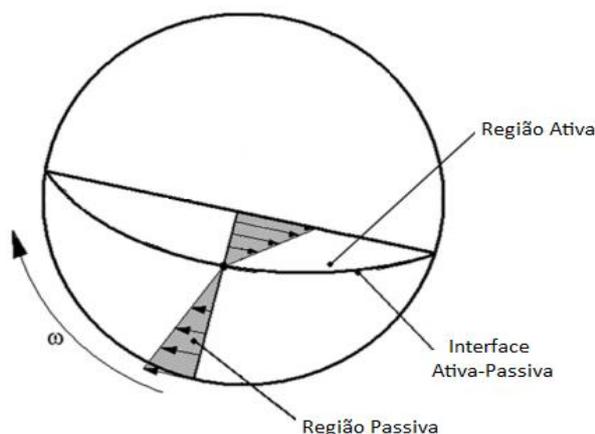


Figura 2.3: Localização das camadas ativa e passiva do regime de rolamento em um tambor rotatório (Adaptado de AISSA *et al.*, 2012).

Como demonstrado pela Figura 2.3, existe um ponto de inversão de sentido da velocidade do material, uma vez que na região passiva as partículas deslocam-se no sentido de rotação do tambor enquanto que na região ativa este sentido é invertido. Essa inversão ocorre devido ao movimento da parede do tambor. Próximo desta região de interface ativa-passiva, a velocidade das partículas é praticamente igual a zero e elas deslocam-se em trajetórias descritas por vórtices. Com a localização deste ponto, é possível encontrar a espessura da camada ativa, dada pela diferença entre a altura da superfície livre do leito e localização do ponto de inflexão (BOATENG E BARR, 1997; SANTOS *et al.*, 2015).

Mellmann (2001) concluiu em seus estudos que o grau de enchimento é a variável que apresenta a maior influência na transição dos regimes de rolamento para o cascadeamento e centrifugação, e não o número de Froude, como reportado por alguns autores. De acordo com os experimentos de Blumberg e Schlünder (1996), esta transição também é dependente do tamanho de partícula e da velocidade de rotação do tambor.

Devido às características apresentadas por este regime, na maioria dos processos, tem-se uma preferência pelo mesmo, já que fornece condições favoráveis para a transferência de

calor e massa, garantindo um produto uniforme e de qualidade. No trabalho desenvolvido por Cristo *et al.* (2006), os autores recomendam que, durante o processo de torrefação, o regime de escoamento do leito de partículas deve ser o de rolamento a fim de garantir a uniformidade da transferência de calor dentro do equipamento.

Nafsun e Herz (2016) estudaram a distribuição da temperatura no leito de partículas dentro de um tambor rotatório operando no regime de rolamento, uma vez que uniformidade no perfil de temperatura é importante para a qualidade do produto. Os experimentos foram conduzidos com esferas de vidro a um grau de enchimento e velocidade de rotação constantes. Os resultados evidenciaram que a diferença de temperatura na direção radial é menor na parte superior do leito, onde se encontra a camada ativa, devido a mistura das partículas nesta região.

- Regime de Cascadeamento

À medida que a velocidade de rotação do tambor aumenta, as partículas na parte superior do leito são transportadas até uma posição mais elevada, antes de se desprenderem da superfície. A superfície do leito passa a assumir uma forma curva e o leito na seção transversal do cilindro começa a arquear-se. À medida que a velocidade aumenta, essa curvatura se mostra tão pronunciada, que apresenta o formato de um “feijão” ou “rim” (MELLMANN, 2001).

Blumberg e Schlünder (1996) afirmou que a transição para o regime de cascata é dependente do tamanho da partícula e nota-se que a altura do arco do leito com formato de “rim” aumenta com o aumento da velocidade de rotação do cilindro (MELLMANN, 2001).

Santomaso *et al.* (2003) estudaram as transições entre os regimes de rolamento, cascadeamento e catarateamento, dadas as suas aplicações industriais. Foram desenvolvidas expressões que relacionam a forma da superfície (expressa em termos de três comprimentos característicos) com as condições de operação, bem como as propriedades de atrito das partículas e da parede do tambor. As relações criadas pelos autores contêm além de parâmetros geométricos, o número de Froude e propriedades de atrito que controlam a dinâmica do movimento de sólidos em tambores rotatórios.

- Regime de Catarateamento

Com um contínuo aumento da velocidade de rotação do cilindro, a superfície do leito de partículas apresenta um formato cada vez mais sigmoidal. As forças centrífugas tornam-se cada vez mais intensas sobre o movimento das partículas, a curvatura da superfície torna-se altamente pronunciada e as partículas passam a ser projetadas para o espaço livre do tambor (AISHA *et al.*, 2012; HEMA, 2003).

Com o aumento da velocidade de rotação, o número de partículas lançadas e o comprimento da trajetória das mesmas aumentam até que um “véu” uniforme seja formado ao longo da seção transversal do equipamento (MELLMANN, 2001).

Outro trabalho desenvolvido por Santomaso *et al.* (2005) realizou uma comparação entre o regime de rolamento e o de catarateamento em relação à eficiência de mistura entre partículas com as mesmas características e de cores distintas. Os resultados encontrados pelos autores evidenciaram grandes diferenças entre a eficiência de mistura dos regimes e os seus mecanismos de funcionamento. Entretanto, concluíram que uma combinação entre eles, considerando uma ordem em que o rolamento antecede a catarata, leva a um processo de mistura mais eficiente e em menor tempo.

- Regime de Centrifugação

Após o regime de catarateamento, com elevação da velocidade do tambor rotatório, atinge-se a centrifugação. Neste regime as partículas aderem-se à parede do cilindro e o movimento relativo entre elas é minimizado.

Segundo Watanabe (1999), o regime de centrifugação pode ter seu início definido de duas maneiras, conforme ilustrado pela Figura 2.4. A primeira afirma que a centrifugação começa quando todas as partículas estão aderidas à parede interna do cilindro e formam um único anel. A outra definição estabelece o começo do regime quando apenas a camada mais externa de partículas adere-se à parede do tambor.

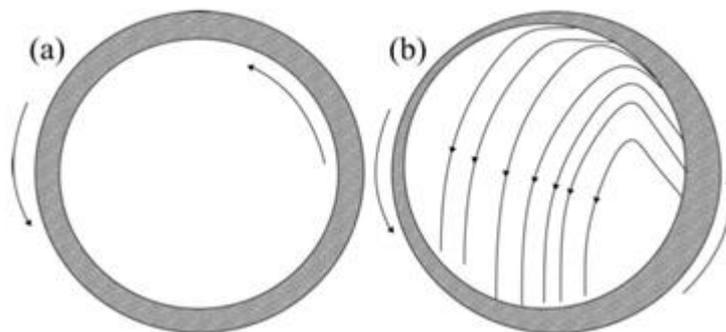


Figura 2.4: Diferentes definições para o regime de centrifugação: a) todas as partículas estão aderidas à parede do tambor; b) apenas a camada mais externa de partículas do leito está aderida à parede do tambor (SANTOS, 2015).

Teoricamente, de acordo com Mellmann (2001), o estágio final da centrifugação é alcançado quando todo o material sólido forma um anel que se adere à parede do cilindro, tornando-se uma camada uniforme. No entanto, este estágio de centrifugação só é alcançado para velocidades de rotação bastante elevadas. Assim, vale ressaltar que quando tem-se apenas a camada mais externa de partículas aderida à parede do tambor rotatório, tal material aderido já não mais participa dos processos de transferência, seja de calor, massa ou quantidade de movimento, e portanto, o regime de centrifugação já iniciou-se.

Durante a centrifugação, a força centrífuga e a força gravitacional, atuando sobre as partículas, entram em equilíbrio. Dessa forma, o número de Froude ( $Fr$ ), adimensional que representa a relação entre estas duas forças, iguala-se a um. Assim, encontra-se a velocidade crítica de centrifugação ( $\omega_c$ ) dada pela mecânica clássica, apresentada pela Equação 2.2, sendo  $g$ , a aceleração da gravidade e  $R$ , o raio do tambor.

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g}{R}} \quad (2.2)$$

Porém, esta velocidade pode depender também de outras variáveis, como características da partícula e do grau de preenchimento. Watanabe (1999) estudou experimental e numericamente a velocidade crítica de rotação para o regime de centrifugação em moinhos de bola. O autor encontrou que tal velocidade depende significativamente da fração de enchimento em relação ao volume do equipamento, e que a relação entre as duas variáveis apresenta um

comportamento não linear. A relação comporta-se como uma assíntota: à medida que a fração de enchimento do moinho aumenta, a velocidade crítica de rotação se aproxima da velocidade prevista pela tradicional equação de Rose e Sullivan (1957) – Equação 2.3, em que  $D$  é o diâmetro do tambor e  $d$ , o da partícula. Para casos em que o diâmetro do equipamento é muito maior que o da partícula, a Equação 2.3 pode ser simplificada e equivale a Equação 2.2.

$$\omega_c = \sqrt{\frac{2g}{D-d}} \quad (2.3)$$

Ao longo dos anos, algumas correlações foram propostas com a intenção de prever de maneira mais adequada a velocidade crítica de centrifugação para partículas em tambores rotatórios.

Walton e Braun (1993) apresentaram a Equação 2.4, que acrescenta o ângulo de repouso dinâmico do material ( $\theta_s$ ), observado no regime de rolamento.

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g}{R \sin \theta_s}} \quad (2.4)$$

Ristow (1998) adicionou à equação da mecânica clássica o grau de enchimento ( $f$ ), como dado pela Equação 2.5.

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g}{R \sqrt{1-f}}} \quad (2.5)$$

Juarez *et al.* (2011) propuseram uma alteração na equação da mecânica clássica que considera o efeito das densidades das partículas ( $\rho_s$ ) e do fluido de preenchimento ( $\rho_f$ ) do tambor, obtendo a Equação 2.6. Para situações em que a densidade dos sólidos é muito maior a densidade da fase fluida, o termo referente à relação entre as duas densidades vale

aproximadamente zero e pode ser simplificado. Este é o caso, por exemplo, de moinhos de bolas, nos quais a densidade dos corpos moedores é alta.

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g(1 - \rho_f/\rho_s)}{R \operatorname{sen}\theta_s \sqrt{1 - f}}} \quad (2.6)$$

## 2.2 Abordagem Numérica

### 2.2.1 Fluidodinâmica computacional

Por meio da análise de processos ou dados experimentais é possível identificar os fenômenos e leis que descrevem estes processos e elaborar modelos matemáticos para sua descrição. Estes modelos podem ser, então, resolvidos por meio de códigos computacionais empregando-se métodos numéricos associados à ferramenta computacional. Dessa forma, o desenvolvimento da modelagem computacional é bastante relevante (SANTOS, 2008).

O crescente avanço da tecnologia dos computadores abriu novas possibilidades para a abordagem de problemas que exigem cálculos e soluções para os mais completos modelos matemáticos, como é o caso das simulações pela técnica da fluidodinâmica computacional (CFD). A técnica de CFD destaca-se em aplicações nas áreas de engenharia e possibilita a simulação de problemas complexos como sistemas multifásicos, reacionais, perfis de escoamento, aerodinâmicos, entre outros.

Tendo em vista o avanço na capacidade de processamento e armazenamento de dados dos computadores, tem-se um número cada vez maior de softwares de CFD disponíveis. Os códigos CFD, além de resolverem complexos sistemas de equações, permitem a geração de malhas, o controle e acompanhamento da solução ao longo do tempo e também possuem alta capacidade gráfica para visualização dos resultados (DUARTE, 2006).

A Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia já desenvolveu vários trabalhos que utilizam a técnica de CFD como uma ferramenta para análise

de fenômenos inerentes a processos. Dentre estes estudos, podem-se citar os trabalhos de Duarte (2006), Vieira (2006), Lacerda (2007), Almeida (2008), Silvério (2012), Nascimento (2014), Santos (2015), Machado (2016), dentre outros.

A técnica de CFD pode contribuir de maneira significativa para compreensão dos fenômenos envolvidos no escoamento de partículas em equipamentos diversos e auxiliar a sua operação em muitos processos. Mas é imprescindível nos estudos utilizando-se fluidodinâmica computacional realizar uma verificação das simulações numéricas através dos dados experimentais.

O estudo da fluidodinâmica de partículas em escoamento pode ser feito por meio de duas abordagens: Euleriana ou Lagrangeana.

### **2.2.2 Abordagem Lagrangeana**

A abordagem Lagrangeana consiste na utilização de modelos DEM (*Discret Element Method*), que permite simular partículas em movimento como pontos de massa em sistemas concentrados. Nesta abordagem o comportamento de cada partícula é estudado de maneira individual, sendo baseado em sua trajetória. Os modelos DEM incluem o efeito de forças externas além de interações entre as partículas (SILVÉRIO, 2012; NASCIMENTO 2014).

Na metodologia DEM considera-se cada partícula individualmente e aplica-se a cada uma a equação do movimento de Newton e a lei da força-deformação para o contato entre elas. Tal fato torna o sistema “discreto” e por isso o método é denominado de Método dos Elementos Discretos (COETZEE e ELS, 2009).

O método tem como desenvolvedores pioneiros Cundall e Strack (1979), com relatos de aplicação inicial voltada para trabalhos bidimensionais em que as partículas rígidas eram tratadas como discos ou esferas. Originalmente, o método foi empregado para problemas que envolviam fraturas de rochas (JING e STEPHANSSON, 2007).

Como explicitado por Peng (2014), o método DEM é um algoritmo baseado no passo do tempo, isto é, as etapas do algoritmo se repetem e os resultados em cada passo do tempo são baseados nos dados anteriores. Para os sistemas simulados pela metodologia DEM, um número finito de partículas interagem entre si e há dois tipos de interações calculadas a cada passo de tempo:

1. As forças de contato são geradas com base nas sobreposições entre partículas.
2. O movimento das partículas é atualizado no tempo com base em informações anteriores a respeito do movimento das mesmas e em forças de contato atuais.

O algoritmo da Figura 2.5 representa uma descrição visual de como o processo de resolução das equações pelo método DEM é desenvolvido.

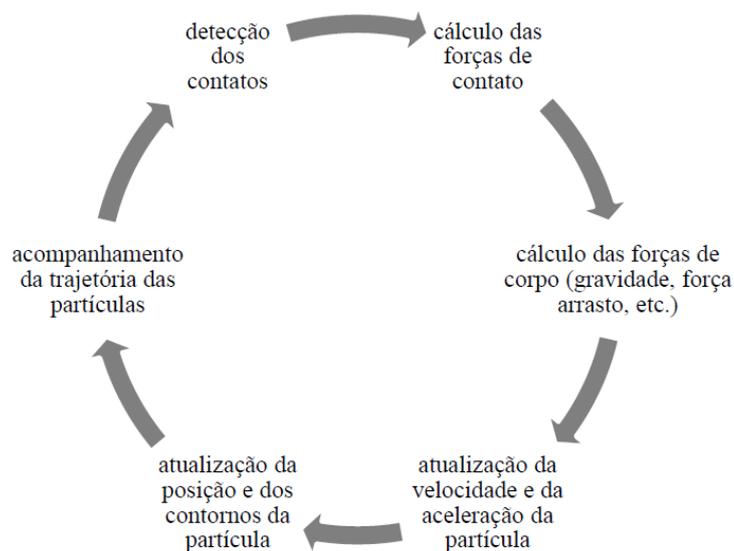


Figura 2.5: Algoritmo de resolução da metodologia DEM (Adaptado de DEM Solutions, 2005).

Segundo Decker *et al.* (2004), dentre as dificuldades existentes para aplicação da abordagem Lagrangeana, estão a necessidade de utilizar correlações para descrever as interações partícula-parede, partícula-partícula e partícula-gás.

Além disso, Rock e Wilkinson (2008) apontam a dificuldade de se obter respostas mecânicas globais como uma das principais limitações da metodologia DEM. Para aplicação deste método, o domínio é discretizado e os resultados são dados para partículas distintas que estão em contato entre si, ao passo que se pode precisar de dados do comportamento de todo o leito de partículas.

A configuração de simulações precisas empregando a metodologia DEM requer dados sobre as propriedades dos materiais em estudo. Estes dados podem ser derivados de estimativas ou medidos por meio de experimentos. Além disso, também é possível utilizar os valores padrão do software (*default*) de simulação em vez de dados obtidos experimentalmente. Assim, têm-se poucas simulações baseadas em dados de caracterização validados de maneira experimental (JUST *et al.*, 2013).

Uma fase muito importante na validação dos resultados empregando a metodologia Lagrangeana é a “calibração”, que consiste na variação de parâmetros durante as etapas de simulação, de modo que a simulação numérica reproduza, quantitativamente, resultados experimentais usados como referência. Em razão disso, é possível que o valor experimental de um parâmetro medido isoladamente não represente o comportamento real (*bulk*) do sistema analisado. Assim, a “calibração” torna possível uma maior concordância entre dados experimentais e numéricos (LOUREL *et al.*, 2006).

Assim, as informações citadas por Just *et al.* (2013) e Lourel *et al.* (2006), confirmam a necessidade do processo de “calibração”, uma vez que as medidas dos dados experimentais podem não reproduzir exatamente o comportamento *bulk* das propriedades que se deseja conhecer.

### **2.2.2.1 Formulação Numérica**

Na abordagem DEM, os movimentos de rotação e translação de uma partícula de raio  $r_i$  e massa  $m_i$  são dados pela segunda lei de Newton, conforme apresentado pelas Equações 2.7, 2.8 e 2.9 (LIU *et al.*, 2013):

$$m_i \frac{du_i}{dt} = \sum_j F_{c,ij} + m_i g \quad (2.7)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = - \sum_j r_{pi} n_{ij} \times F_{c,ij} \quad (2.8)$$

$$\frac{dr_i}{dt} = u_i \quad (2.9)$$

Em que:

- $u$  – velocidade linear da partícula;
- $\omega$  – velocidade angular da partícula;
- $g$  – aceleração da gravidade;
- $r_p$  – vetor posição da partícula;
- $F_{c,ij}$  – força de contato entre partículas;
- $n_{ij}$  – vetor normal unitário na linha que conecta os centros das partículas de índice  $i$  e  $j$ ;
- $I$  – momento de inércia da partícula.

Para representar a lei de força-deslocamento, tem-se dois modelos básicos que são mais utilizados para simulações em DEM, sendo eles: modelo linear mola-amortecedor (*linear spring-dashpot model*) e o modelo não linear de Hertz-Mindlin.

Estes modelos são as bases das equações governantes dos movimentos de translação e rotação.

- Modelo mola-amortecedor

Conforme descrito por Suzzi *et al.* (2012), no modelo linear mola-amortecedor a força normal é calculada pela adição de dois termos: um termo elástico modelado de forma similar a uma mola e um termo que representa a dissipação, modelado como um amortecedor, conforme Equação 2.10.

$$F_{c,n,ij} = k_n \delta_{n,ij} + c_n \dot{\delta}_{n,ij} \quad (2.10)$$

O termo  $k_n$  representa o coeficiente normal de rigidez,  $c_n$  é o coeficiente normal de amortecimento e  $\delta_{n,ij}$  a sobreposição normal das partículas. O coeficiente de rigidez é avaliado com base em propriedades físicas e geométricas das partículas em uma velocidade de colisão característica. As forças que atuam tangencialmente são representadas pela Equação 2.11, de forma semelhante ao modelo mola-amortecedor.

$$F_{c,t,ij} = \begin{cases} k_t \delta_{t,ij} + c_t \dot{\delta}_{t,ij}, & \text{se } F_{c,t,ij} \leq \mu F_{c,n,ij} \\ \mu F_{c,n,ij} \frac{\delta_{t,ij}}{|\delta_{t,ij}|}, & \text{se } F_{c,t,ij} \geq \mu F_{c,n,ij} \end{cases} \quad (2.11)$$

Em analogia ao modelo descrevendo a força normal, o termo  $k_t \delta_{t,ij}$  representa a força da mola na direção tangencial, enquanto  $c_t \dot{\delta}_{t,ij}$  descreve a contribuição do elemento amortecedor e  $\mu$  representa coeficiente de atrito entre os dois materiais em contato. Tal analogia explicitada pelas equações está ilustrada na Figura 2.6, na qual  $\eta_n$  representa a força normal ( $F_{c,n,ij}$ ) e  $\eta_t$  representa a força tangencial ( $F_{t,n,ij}$ ).

Embora o modelo linear mola-amortecedor possua uma modelagem matemática bastante simples, ele pode ser aplicado em sistemas estáticos e dinâmicos e ainda apresentar uma alta estabilidade (PENG, 2014).

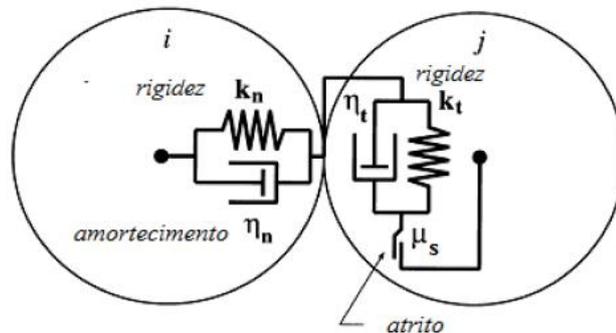


Figura 2.6: Esquema simplificado das forças de contato (Adaptado de MUGURUMA *et al.*, 2000).

Este modelo ainda é amplamente utilizado na área de simulações empregando a metodologia DEM, apesar do desenvolvimento de modelos não lineares que fornecem benefícios, mas também aumentam o esforço computacional necessário para sua resolução (SUZZI *et al.*, 2012).

- Modelo de Hertz-Mindlin

Quando a forma da partícula é levada em consideração, um modelo elástico linear pode não ser suficientemente preciso e nestes casos é necessário a utilização do modelo de Hertz, que devido a sua complexidade é empregado em uma aproximação mais prática, de acordo com a contribuição de Mindlin. O modelo de Hertz descreve o contato elástico entre duas partículas na direção normal, sendo que Mindlin e Deresiewicz (1953) propuseram um modelo de força tangencial. A combinação dos modelos Hertz-Mindlin foi proposta por Renzo e Maio (2005).

Como apresentado de uma maneira simplificada por Peng (2014) e Merendino (2011), nesta modelagem, a força normal é dada pela Equações 2.12 e 2.13, sendo  $E^*$  o módulo de Young e  $R_{ij}^*$  o raio equivalente de duas partículas  $i$  e  $j$  em contato.

$$F_n^E = -\frac{4}{3}E^*\sqrt{R^*}\delta_{n,ij}^{0,5}\delta_{n,ij} \quad (2.12)$$

$$R_{ij}^* = \frac{r_i r_j}{r_i + r_j} \quad (2.13)$$

A força tangencial é representada pela Equação 2.14, na qual  $G^*$  representa o módulo de cisalhamento.

$$F_t = -\frac{2}{3}(8G^*\sqrt{R^*}\delta_{n,ij}^{0,5})\delta_{t,ij} \quad (2.14)$$

Em simulações onde o atrito de rolamento é importante ele é estimado pela aplicação de um torque nas superfícies de contato conforme a Equação 2.15.

$$\tau_i = -AR_{pw}F_n^E R_i \omega_i \quad (2.15)$$

Na qual:

- $AR_{pw}$  – coeficiente de atrito de rolamento partícula-parede;
- $R_i$  – distância entre o centro de massa da partícula até o ponto de contato na superfície;
- $\omega_i$  – vetor unitário de velocidade angular da partícula no ponto de contato.

O modelo de Hertz-Mindlin é adequado para modelar problemas que envolvem escoamento granular, no qual não há ligação entre as partículas (coesão ou aderência).

#### **2.2.2.2 Alguns estudos em Tambores Rotatórios – Metodologia Lagrangeana**

O trabalho desenvolvido por Yang *et al.* (2003) apresenta um estudo numérico do fluxo de partículas em um tambor rotatório horizontal utilizando o método DEM. O método de simulação é validado a partir de sua boa concordância com os dados experimentais referentes ao ângulo de repouso dinâmico e perfis de velocidade medidos por Parker *et. al* (1997), utilizando a técnica não invasiva de PEPT (Positron Emission Particle Tracking). Os autores estudaram a dinâmica no tambor rotatório em um escala microscópica. Os resultados foram apresentados em termos de porosidade, número de coordenação – que contabiliza o número de partículas em contato com uma determinada partícula em estudo, e forças estruturais e de contato entre os sólidos, como frequência e velocidade relativa de colisões. Por fim, os resultados obtidos demonstraram concordância com os dados experimentais e sua análise demonstrou que informações em nível microdinâmico são relevantes para a compreensão do efeito da velocidade de rotação sobre aglomerado de partículas.

O trabalho de Just *et al.* (2013), da mesma forma, investigou simulações DEM em tambores rotatórios para descrever o processo de recobrimento de comprimidos na indústria farmacêutica. As propriedades do material como módulo de Young, coeficientes de restituição e de atrito foram determinadas experimentalmente. Os valores experimentais encontrados para

os coeficientes de atrito não foram capazes de representar adequadamente a movimentação dos comprimidos no interior do tambor. Dessa forma, os autores encontraram a necessidade de realizar uma calibração referente a estes parâmetros. O estudo mostra que, apesar de parâmetros baseados em dados experimentais permitirem uma modelagem mais precisa, tais estimativas são viáveis de serem utilizadas até certa extensão, ou seja, também possuem limitações quando utilizadas para prever o comportamento *bulk* do material.

Alizadeh *et. al* (2013) estudaram a dinâmica de partículas de vidro em um tambor rotatório operando no regime de rolamento, por meio de experimentos e simulações DEM. A validação do modelo computacional foi feita por meio de comparações com dados obtidos utilizando-se a técnica chamada de rastreamento radioativo de partículas (RPT), baseada na atenuação de raios gama pelo material. As propriedades do material em estudo para uso nas simulações foram medidas experimentalmente ou retiradas da literatura. Os resultados encontrados pelos autores envolviam perfis de velocidade, caracterização das camadas ativa e passiva no regime, e tempos de residência dos sólidos. O trabalho também buscou estudar a dispersão axial de partículas, empregando materiais com diferentes diâmetros. A simulação Lagrangeana reportou a existência de segregação para as condições avaliadas, o que não foi confirmado durante os testes. Entretanto, para os outros parâmetros testados, obteve-se boa concordância entre os dados simulados e os experimentais.

Qi *et al.* (2015) investigaram os perfis de velocidades em um tambor rotatório operando em regime de rolamento através de simulações DEM, com a intenção de aprofundar o conhecimento sobre as relações de *scale up* para estes equipamentos. Um método estatístico foi utilizado para avaliar a semelhança entre os perfis de velocidade para diferentes proporções de tamanho e propriedades do material. Verificou-se que a razão de tamanho partícula/tambor exerce um importante papel na determinação dos vetores de velocidade, assim como os valores de coeficiente de atrito estático e módulo de cisalhamento empregados nas simulações. Por fim, os autores concluíram que as regras de similaridade em fluxos granulares merecem investigações adicionais, devido à complexidade no *scale up* de tambores operando com materiais granulares, que possuem natureza discreta e complexas forças entre as partículas.

Norouzi *et al.* (2015) conduziram simulações DEM em tambor rotatório a fim de caracterizar o comportamento de fluxo de partículas esféricas e não-esféricas em diferentes

condições operacionais. Novas correlações de dimensionamento foram propostas para avaliar e caracterizar o perfil de velocidade e o tempo de circulação durante os regimes de rolamento e cascata. Para isto, foram considerados os efeitos da velocidade rotacional, do nível de enchimento, do tamanho do tambor e do tamanho e formato da partícula. O efeito do formato da partícula foi incluído nestas correlações usando dados do ângulo de repouso dinâmico do leito. Foi observado que a transição entre os regimes de rolamento e cascadeamento não depende somente do número de Froude, do grau de enchimento e do tamanho da partícula, mas também do formato da mesma.

Da mesma maneira apresentada para a abordagem Lagrangeana, a seguir será descrita a abordagem Euleriana, bem como a sua formulação numérica e alguns estudos relevantes presentes na literatura.

### **2.2.3 Abordagem Euleriana**

A resolução numérica dos escoamentos multifásicos pela abordagem Euleriana considera que as diferentes fases do sistema são matematicamente contínuas e interpenetrantes. O modelo Euleriano resolve um conjunto de equações de momento e continuidade para cada fase. O acoplamento é realizado através da pressão e troca de coeficientes de transferência (de massa, energia ou movimento) entre as fases. A maneira em que este acoplamento é tratado depende do tipo de fases envolvidas (VIEIRA, 2006).

No escoamento granular (fluido-partícula), os fluxos são tratados de maneira diferente do que no escoamento não-granular (fluido-fluido). Para fluxos granulares, o Modelo Euleriano resolve as equações de transporte de movimento e de massa para cada uma das fases envolvidas. Nestes casos, as propriedades da fase sólida são obtidas a partir da aplicação de Teoria Cinética Granular. Este Modelo Euleriano Granular Multifásico é o mais complexo modelo multifásico implementado pelo software Fluent® e pode ser utilizado, por exemplo, para simulação de colunas de bolhas, sedimentadores, leito de jorro e leito fluidizado, dentre outros (FLUENT User's Guide, 2006).

As simulações Eulerianas desenvolvidas neste trabalho utilizaram o Modelo Euleriano Granular Multifásico para estudar a dinâmica das partículas de café no tambor rotatório.

### 2.2.3.1 Formulação Numérica

Dentro da modelagem Euleriana, a conservação de massa para a fase sólida e para a fase fluida são expressas conforme as Equações 2.16 e 2.17, respectivamente.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) = 0 \quad (2.17)$$

Para as Equações 2.16 e 2.17 deve-se respeitar a restrição de que a soma das frações de volume de cada fase equivalem a unidade, conforme dado pela Equação 2.18. Para todas as expressões, os subscritos  $s$  e  $f$  denotam as fases sólida e fluida, respectivamente.

$$\alpha_s + \alpha_f = 1 \quad (2.18)$$

Da mesma maneira, se apresentam a conservação da quantidade de movimento para a fase sólida (Equação 2.19) e para a fase fluida (Equação 2.20).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla P_s + \nabla \cdot \bar{\bar{T}}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + [K_{sf}(\vec{v}_f - \vec{v}_s)] \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f \vec{v}_f) = -\alpha_f \nabla P + \nabla \cdot \bar{\bar{T}}_f + \alpha_f \rho_f \vec{g} + [K_{sf}(\vec{v}_s - \vec{v}_f)] \quad (2.20)$$

Em que:

- $\rho$  – massa específica;
- $\vec{v}$  – velocidade média local;
- $P_s$  – pressão dos sólidos;
- $P$  – pressão;
- $\bar{\bar{T}}_s$  – tensor tensão da fase sólida;
- $\bar{\bar{T}}_f$  – tensor tensão da fase fluida;
- $\vec{g}$  – aceleração da gravidade;
- $K_{sf}$  – coeficiente de troca de momento entre as fases.

Outro parâmetro relevante na modelagem Euleriana é a viscosidade granular. Para a viscosidade granular *bulk* ( $\lambda_s$ ), que contabiliza a resistência ao escoamento das partículas devido à sua expansão e compressão, tem-se o modelo de Lun *et al.* (1984) como o mais utilizado (Equação 2.21):

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left( \frac{\theta}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.21)$$

Sendo  $e_{ss}$  o coeficiente de restituição entre as partículas,  $g_{0,ss}$  a função de distribuição radial e  $\theta$  a temperatura granular.

Já a viscosidade granular cisalhante ( $\mu_s$ ) é dada pela soma de três parcelas, referentes aos efeitos cinético, colisional e friccional. A combinação linear da soma entre estes efeitos foi proposta por Savage (1981) e considera três diferentes regiões de dissipação viscosa para o escoamento granular: região cinética, região colisional e região friccional, conforme a Equação 2.22.

$$\mu_s = \mu_{s,cin} + \mu_{s,col} + \mu_{s,fric} \quad (2.22)$$

O conceito destas regiões é baseado na diferença de concentração entre as partículas que pode surgir nos escoamentos granulares. Na modelagem do escoamento com a presença de

sólidos deve-se levar em conta a não homogeneidade da porosidade ao longo do leito de material.

De acordo com Darteville (2003), na região em que o fluxo de partículas é menos concentrado, os grãos se movimentam aleatoriamente. Nessa região predomina a dissipação viscosa cinética ( $\mu_{S,cin}$ ), devido somente ao movimento aleatório das partículas, a qual pode ser calculada pelos modelos de Gidaspow (1994), apresentado pela Equação 2.23 e de Syamlal *et al.* (1993), dado pela Equação 2.24.

$$\mu_{S,cin} = \frac{10\rho_S d_S \sqrt{\theta\pi}}{96\alpha_S (1+e_{SS}) g_{0,SS}} \left[ 1 + \frac{4}{5} g_{0,SS} \alpha_S (1+e_{SS}) \right]^2 \alpha_S \quad (2.23)$$

$$\mu_{S,cin} = \frac{\alpha_S \rho_S d_S \sqrt{\theta\pi}}{6(3-e_{SS})} \left[ 1 + \frac{2}{5} (1+e_{SS})(3e_{SS}-1)\alpha_S g_{0,SS} \right] \quad (2.24)$$

Em uma região com uma concentração intermediária, tem-se, além da dissipação viscosa cinética, outra forma de dissipação causada por colisões instantâneas entre o material particulado. Assim, essa segunda forma de dissipação viscosa que é causada pelas colisões entre as partículas é denominada colisional ( $\mu_{S,col}$ ). Geralmente calcula-se esta viscosidade utilizando-se também o modelo de Syamlal *et al.* (1993), como na Equação 2.25.

$$\mu_{S,col} = \frac{4}{5} \alpha_S^2 \rho_S d_S g_{0,SS} (1+e_{SS}) \sqrt{\frac{\theta}{\pi}} \quad (2.25)$$

Já para regiões de alta concentração de partículas, os contatos entre os grãos começam a ser mais longos e duradouros, referentes ao deslizamento e ao atrito entre as partículas. Esta terceira forma de dissipação viscosa, tem origem bastante distinta das anteriores, é dita dissipação viscosa friccional. A dissipação viscosa friccional ( $\mu_{S,fric}$ ) geralmente surge em regiões onde a fração de volume da fase sólida é próxima do limite de empacotamento do leito. Os modelos de Johnson e Jackson (1987) e Schaeffer (1987) podem ser usados para calcular

esta viscosidade. Para incluir a viscosidade friccional nos cálculos das simulações feitas com o software Fluent®, o programa utiliza o modelo de Schaeffer, dado pela Equação 2.26.

$$\mu_{S,fric} = \frac{P_s \text{sen}(\phi_e)}{2\sqrt{\bar{I}_{2D}}} \quad (2.26)$$

Na expressão acima (Equação 2.26), tem-se que  $\phi_e$  é o ângulo de fricção interna ou ângulo de repouso estático,  $\bar{I}_{2D}$  o segundo invariante do tensor taxa de deformação e  $P_s$  a pressão de sólidos.

Observa-se que quando o ângulo de fricção interna tende a zero, a viscosidade friccional tende, também, a zero. Este ângulo é função somente do material, possuindo um pequeno valor nos casos em que as partículas são grandes, arredondadas e de superfícies suaves (SANTOS, 2011).

A interação entre a fase fluida e a fase sólida para a modelagem Euleriana granular é computada pela força de arraste. Esta interação é calculada pelo coeficiente de troca de momento entre as fases ( $K_{sf}$ ).

Santos (2015) estudou numericamente o escoamento granular de diferentes partículas em um tambor rotatório. O autor testou a influência de quatro modelos de arraste, sendo: Gidaspow *et al.* (1992), Huilin *et al.* (2003), Syamlal e O'Brien (1988), Gibilaro *et al.* (1985) e também avaliou os resultados sem a presença de modelo de força de arraste. O autor verificou resultados idênticos no comportamento dinâmico dos sólidos para todos os casos testados.

Já para a investigação das interações entre as partículas da fase granulada, é aplicada a Teoria Cinética Granular. Visto que partículas podem mover-se aleatoriamente no escoamento e, conseqüentemente, estarem sujeitas a uma flutuação em seu movimento, assim como as moléculas em um gás, a mesma demonstração feita na teoria cinética dos gases pode ser aplicada para o escoamento granular. Logo, a substituição das moléculas por partículas dá origem à Teoria Cinética do Escoamento Granular (LUN *et al.*, 1984).

A teoria cinética granular representa uma analogia com a teoria cinética dos gases e a partir dela é possível calcular propriedades inerentes a fluidos como viscosidade, pressão e temperatura, a partir de equações que são funções da flutuação da velocidade e da fração volumétrica do leito.

Dentro da teoria cinética granular, os seguintes conceitos, apresentados de maneira simplificada, são utilizados para descrever propriedades da fase granular:

- I. Função de distribuição radial ( $g_{0,ss}$ ) (Equação 2.27): computa a probabilidade de colisão entre partículas.

$$g_{0,ss} = \left[ 1 - \left( \frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (2.27)$$

Sendo  $\alpha_s$  a fração volumétrica da fase sólida e  $\alpha_{s,max}$  o limite máximo de empacotamento.

- II. Temperatura granular (Equação 2.28): é uma medida da energia cinética das partículas devido à flutuação de velocidade das mesmas.

$$\theta = \frac{1}{3} \langle v_s^2 \rangle \quad (2.28)$$

- III. Pressão de sólidos: fisicamente, representa a força normal exercida pela fase sólida devido ao impacto de partículas sobre uma superfície. Assim, maior energia da fase sólida leva a uma maior a pressão granular. É dada pela soma de dois termos, como na Equação 2.29: a primeira parcela equivale ao termo cinético e a segunda, ao termo colisional.

$$P_s = \alpha_s \rho_s \theta + 2 \rho_s \alpha_s^2 g_{0,ss} \theta (1 + e_{ss}) \quad (2.29)$$

### 2.2.3.2 Alguns estudos em Tambores Rotatórios – Metodologia Euleriana

O estudo conduzido por Delele *et. al* (2016) desenvolveu um modelo 3D multifásico baseado na abordagem Euleriana de um tambor para a previsão da fluidodinâmica de grãos de trigo. Os autores avaliaram o modelo por meio dos resultados de velocidade das partículas, ângulo de repouso dinâmico, espessura da camada ativa, velocidade do ar dentro do tambor e medidas de tempo de residência. As simulações buscaram avaliar os efeitos da velocidade de rotação do tambor, grau de enchimento, taxa de alimentação e ângulo de inclinação do cilindro. Foi observado que o ângulo de repouso dinâmico e a espessura da camada ativa aumentam proporcionalmente à velocidade de rotação do tambor e ao grau de enchimento, enquanto o tempo de residência médio diminuiu. Além disto, existem poucos trabalhos publicados a respeito da interação das partículas com a movimentação do fluido em tambores rotatórios e Delele *et. al* (2016) apresentaram resultados mostrando a influência da presença das partículas na movimentação do ar dentro do tambor rotacionando. Bons resultados foram obtidos, tanto quantitativa quanto qualitativamente, ao comparar os dados previstos pelo modelo com os valores experimentais, com exceção do tempo de residência das partículas.

He *et al.* (2007) também utilizaram modelagem Euleriana para estudar os fenômenos de fluxo e segregação de misturas binárias em tambores rotatórios. Os autores empregaram o modelo multifásico granular para simular o comportamento de esferas de vidro com diferentes diâmetros. A investigação conduzida no estudo avaliou o a segregação transversal no regime de rolamento e concluiu que existe a formação de um núcleo na região central do leito que concentra as menores partículas. A movimentação dos sólidos foi representada de maneira adequada pelo modelo e encontrou-se concordância entre os resultados numéricos e os dados experimentais.

Tambores rotatórios também podem ser equipados internamente com suspensores, como no equipamento usado por Sunkara *et al.* (2015). Os autores empregaram a modelagem Euleriana para escoamentos granulares semelhante à forma como a mesma é utilizada para cilindros sem suspensores. Para validar o modelo, uma técnica de análise de imagens foi desenvolvida para medir o ângulo de repouso cinético de diferentes partículas. Os dados experimentais demonstraram uma boa concordância com os modelos utilizados.

Santos *et al.* (2015) estudaram o comportamento fluidodinâmico de partículas granulares em um tambor rotatório por meio de estudos experimentais e numéricos aplicando a abordagem Euleriana. Os autores analisaram o efeito da velocidade rotacional e do grau de enchimento sobre a velocidade da partícula nas camadas ativa e passiva durante o regime de rolamento. Além disso, também foi investigada a influência de diferentes modelos de arraste no perfil de velocidade das partículas.

### **2.2.3.3 Condições de contorno na parede**

Os resultados da modelagem numérica são bastante sensíveis às condições de contorno escolhidas para descrever um problema. A escolha e implementação adequada da condição de contorno na parede tem importância crucial para que a solução do caso em estudo seja representativa da realidade.

Apesar da relevância das condições de contorno para simulações Eulerianas, existem poucos estudos a respeito da influência de interações entre partículas e a parede no comportamento da fase sólida em tambores rotatórios.

As condições de contorno que descrevem a interação entre o fluido e a parede do equipamento disponíveis para serem utilizadas no software de simulação Fluent® são as seguintes:

- não-deslizamento
- “cisalhamento especificado”
- coeficiente de especularidade
- tensão de Marangoni

As condições de contorno de parede são usadas para relacionar as regiões contendo fluidos (uma vez que a modelagem Euleriana considera as partículas como fluido) e as áreas internas (sólidas) dos equipamentos nas simulações. Em fluxos viscosos, a condição de contorno de não deslizamento é imposta nas paredes por padrão, mas também é possível especificar uma componente de velocidade tangencial em termos do movimento de translação

ou de rotação da parede. Também é possível modelar uma parede deslizando por meio da condição de “cisalhamento especificado”.

A condição de não-deslizamento é aplicada à maioria das situações e por isso é dita padrão e indica que o fluido se adere à parede e se move com a mesma velocidade que ela, caso a parede esteja se movendo (FLUENT User’s Guide, 2006).

As condições de “cisalhamento especificado” e tensão de Marangoni são úteis na modelagem de situações nas quais a tensão de cisalhamento, no lugar do movimento do fluido, é conhecida. Exemplos de tais situações são o esforço de cisalhamento aplicado, a parede com deslizamento (tensão de cisalhamento zero) e as condições de superfície livre (tensão de cisalhamento nula ou tensão de cisalhamento dependente do gradiente de tensão superficial). A condição de cisalhamento especificada permite determinar as componentes x, y e z da tensão de cisalhamento como valores constantes ou perfis.

A condição de contorno de tensão de Marangoni permite especificar o gradiente da tensão superficial em relação à temperatura nesta superfície. A tensão de cisalhamento é calculada com base no gradiente de superfície da temperatura e no gradiente de tensão superficial especificado, conforme Equação 2.30.

$$\tau_c = \frac{d\sigma}{dT} \nabla_s T \quad (2.30)$$

Em que  $d\sigma/dT$  é o gradiente de tensão na superfície em relação à temperatura  $T$  e  $\nabla_s T$  é o gradiente da superfície. Assim, a opção de Marangoni está disponível somente para cálculos nos quais a equação de energia está sendo resolvida.

### **2.2.3.3.1 Coeficiente de Especularidade**

O coeficiente de especularidade é a condição de contorno especificada para ser usada no modelo multifásico granular. Hui *et al.* (1984) e Johnson e Jackson (1987) foram os primeiros autores a estudarem e definirem uma modelagem para o coeficiente de especularidade ( $\varphi$ ).

De acordo com Li e Benyahia (2011), o coeficiente de especularidade é definido como a fração média do momento tangencial relativo transferido em uma colisão entre a partícula e a parede (contorno). Este coeficiente está intimamente relacionado às condições de fluxo e com as propriedades da parede e, sendo assim, não pode ser determinado de maneira independente.

O valor do coeficiente de especularidade depende da condição de deslizamento da parede e de sua rugosidade. Então, ele pode variar de 0, para colisões perfeitamente especulares, com condição de parede lisa e deslizamento livre, e 1, para colisões perfeitamente difusas, com condição de parede rugosa e deslizamento nulo (JOHNSON e JACKSON, 1987).

De acordo com o trabalho de Zhong *et al.* (2015), existe uma diferença relevante entre o coeficiente de especularidade igual a 1 e a condição de não deslizamento (*no slip*) da fase particulada na parede. Para a condição de não deslizamento, a velocidade da fase sólida na parede é considerada igual a zero em todas as direções, enquanto que a velocidade tangencial do sólido em contato com a parede, quando se utiliza o coeficiente de especularidade como condição de contorno, dificilmente será igual a zero, uma vez que a velocidade é definida de acordo com as Equações 2.31 e 2.32 (Zhong *et al.*, 2015):

$$u_{p,w} = -B \frac{\partial u_{p,w}}{\partial n} \quad (2.31)$$

$$B = \frac{6\alpha_{s,\max}\mu_p}{\sqrt{3}\sqrt{\theta}\varphi\rho_p\alpha_p g_0} \quad (2.32)$$

Onde  $\alpha_s$  e  $\rho_p$  são a fração de volume e a densidade da fase sólida,  $\theta$  e  $\mu_p$  são a temperatura granular e a viscosidade do sólido, respectivamente, e  $g_0$  é a função de distribuição radial. Por isso, a condição de contorno dada por Johnson e Jackson (1987) com  $\varphi = 1$  não é equivalente a condição de não deslizamento na parede.

Hiu *et al.* (1984) recomendaram, para obter um valor experimental do coeficiente de especularidade, medir as variações na velocidade tangencial das partículas para um grande

número de colisões com diferentes ângulos e velocidades de impacto em uma seção representativa da parede.

Entretanto, devido à dificuldade em se realizar tais medidas, não se encontra reportado na literatura valores experimentais para o coeficiente de especularidade e nem correlações que permitam estimar o seu valor. Dessa forma, é necessário que se realize simulações numéricas testando diferentes valores de coeficiente de especularidade, a fim de comparar os resultados com os dados experimentais (calibração). Assim, escolhe-se o melhor valor que se ajuste ao problema em questão (LI e BENYAHIA, 2011; BISOGNIN, 2015).

Em relação à utilização do coeficiente de especularidade como condição de contorno na parede para tambores rotatórios, o trabalho de Machado (2016) realizou uma calibração deste parâmetro para encontrar o valor que melhor descrevesse as condições experimentais avaliadas. A autora estudou os regimes de escoamento de corpos moedores no interior de um moinho de bolas e variou os valores do coeficiente de especularidade, assim como o coeficiente de restituição, para simular os regimes de rolamento, catarateamento e centrifugação.

Para o software Fluent®, a implementação desta condição de contorno baseia-se no trabalho de Johnson e Jackson (1987) para fluxos granulares.

#### **2.2.3.4 Malha computacional**

A malha computacional define a discretização espacial do espaço geométrico onde o problema a ser estudado será resolvido numericamente. Sua confecção adequada é de grande relevância para as simulações em CFD. A depender do número de elementos (volumes de controle) e de como eles estão distribuídos na geometria, a qualidade da solução do problema pode ser afetada. Quanto maior o número de elementos, maior a precisão dos resultados simulados, entretanto o esforço computacional necessário também será maior. Dessa forma, é preciso levar em consideração tanto o refinamento da malha (quantidade de células) quanto a precisão da resposta desejada (MACHADO, 2016).

A classificação das malhas é feita de acordo com o formato e a organização dos seus elementos, podendo ser: estruturadas, não estruturadas e híbridas.

De acordo com Duarte (2006), as malhas estruturadas são assim chamadas por estarem organizadas em um padrão regular que se repete, denominado bloco. Devido à dificuldade de se obter uma geometria com apenas um bloco, as técnicas de geração de malha evoluíram e tornou-se possível a utilização de um sistema multiblocos estruturados. Assim, conectam-se vários blocos e se obtém um domínio completo.

Apesar de permitem ao usuário um elevado controle e oferecerem uma maior velocidade para resolução dos problemas algébricos, as malhas estruturadas trazem como desvantagem um elevado tempo e perícia necessários para serem confeccionadas. Além disso, existem algumas geometrias que não podem ser representadas por blocos estruturados.

A malha não-estruturada distribui os elementos de maneira geometricamente irregular, sem apresentar um padrão repetido. Entretanto, a distribuição destes elementos deve satisfazer, igualmente, a critérios de qualidade relacionados à sua forma, caso contrário as simulações podem divergir. Estes tipos de malha geralmente utilizam elementos triangulares em 2D e tetraédricos em 3D, porém atualmente já existem códigos capazes de gerar elementos hexaédricos não-estruturados em 3D. A conectividade das malhas não-estruturadas varia ponto a ponto, ocorrendo assim elementos de formas e tamanhos diferentes dentro da malha, e por isso, podem apresentar vizinhos locais variados (VAZ, 2003).

A principal desvantagem de malhas não-estruturadas em relação a malhas estruturadas (multiblocos) é a difusão numérica quando se empregam triângulos/tetraedros ao invés de retângulos/hexaedros.

Segundo Santos (2011), a utilização das malhas híbridas consiste no emprego simultâneo das malhas estruturadas e não estruturadas em regiões específicas da geometria. Dessa forma, aproveitam-se as vantagens de ambas as configurações de malhas. Para que isto seja possível, é preciso dividir a geometria em regiões distintas, onde se aplicam elementos de grade estruturada e não-estruturada, obtendo-se uma configuração híbrida.

#### **2.2.3.4.1 Malha móvel**

O modelo de malha móvel do software Fluent® é usado quando os limites do domínio variam ao longo do tempo e pode ser aplicado tanto em fluxos monofásicos como multifásicos. A atualização da posição da malha é automaticamente feita pelo resolvidor numérico em cada passo de tempo baseado nas novas posições das fronteiras (NASCIMENTO, 2014).

Em malhas móveis, o movimento relativo de componentes estacionários e rotativos em um equipamento rotativo dará origem a interações transientes. Na maioria das vezes, a solução transiente que é procurada em uma simulação com o emprego de malhas móveis é periódica em relação ao tempo. Isto é, a solução se repete a cada período de tempo relacionado com as velocidades dos domínios em movimento. Assim emprega-se a condição de malha móvel para garantir que todas as células na malha estão se movendo a uma mesma velocidade de rotação (FLUENT User's Guide, 2006).

A condição de malha móvel deve ser empregada, por exemplo, em simulações envolvendo tambores rotatórios equipados internamente com suspensores. Ainda conforme Nascimento (2014), nessas situações não é possível apenas alterar a condição de contorno na parede, já que o deslocamento dos suspensores leva a definição de regiões de parede do equipamento a serem definidas como interior. Por isso, é necessário utilizar uma condição de malha móvel para que toda a malha se movimente a uma mesma velocidade rotacional e seja possível atualizar a posição dos suspensores com o tempo.

Conforme citado, o modelo de malha móvel é usado quando os contornos se movem, de maneira linear ou rotatória, em relação ao outro. Essa condição também deve ser empregada para simular casos em que se deseja definir o coeficiente de especularidade como a condição de contorno na parede.

## **CAPÍTULO 3**

### **MATERIAIS E MÉTODOS**

Este capítulo apresenta a caracterização do material utilizado neste trabalho e a unidade experimental em que os testes foram realizados. Também apresentam-se as metodologias numéricas (Euleriana e Lagrangeana).

## 3.1 Materiais e metodologia experimental

### 3.1.1 Caracterização do material particulado

Para melhor estudar a dinâmica de grãos de café em um tambor rotatório, equipamento geralmente utilizado para a secagem e torra deste material, foi adquirida uma saca de café verde da variedade *Arabica* (qualidade de exportação) de um produtor local. Posteriormente, estes grãos de café verde foram torrados pelo mesmo produtor seguindo um procedimento de torra com duração de vinte e cinco minutos, sendo que durante os cinco primeiros minutos manteve-se a temperatura do torrador igual a 150 °C para desidratação; nos quinze minutos seguintes, elevou-se a temperatura de maneira gradativa até alcançar 200 °C e nos minutos finais, reduziu-se a temperatura até os grãos alcançarem o ponto de torra desejado.

Dessa forma, café verde e café torrado foram os materiais empregados para realização dos estudos experimentais. A Figura 3.1 contém imagens dos grãos de café verde e depois de torrados. Mediu-se a densidade real ( $\rho_s$ ) destas partículas com um picnômetro a gás hélio (modelo Micromeritics AccuPyc 1331). O diâmetro característico do material,  $d_{50}$ , foi determinado por meio do analisador de imagens CAMSIZER, que conta com uma técnica de projeção de imagens das partículas analisadas. Com o CAMSIZER também obteve-se, para ambas as partículas, valores médios de esfericidade ( $\phi$ ), dada por uma relação entre a área projetada da partícula ( $A$ ) e o quadrado de seu perímetro ( $Pe$ ), conforme a Equação 3.1.

$$\phi = \frac{4\pi A}{Pe^2} \quad (3.1)$$



(a) (b)  
Figura 3.1: Grãos de café (a) torrado e (b) verde.

Obteve-se também a umidade do café verde ( $U$ ) pelo método da estufa por 24 horas a 105 °C.

Para a determinação do coeficiente de atrito estático entre a parede do tambor e os grãos de café utilizou-se um plano de inclinação variável cuja superfície foi recoberta com material de mesma rugosidade da parte interna do tambor. O ângulo de inclinação ( $\beta$ ) que correspondia ao início do deslizamento da camada de partículas sobre o plano foi usado para calcular o coeficiente de atrito estático partícula-parede ( $AE_{pw}$ ), de acordo com a Equação 3.2

$$AE_{pw} = \text{tang}(\beta) \quad (3.2)$$

O aparato descrito acima está ilustrado na Figura 3.2. Para determinação do coeficiente de atrito estático entre as partículas, utilizou-se o mesmo dispositivo e recobriu-se a rampa com uma camada de partículas aderidas de maneira aleatória sobre a superfície, como ilustra a Figura 3.3. O mesmo procedimento foi adotado para determinar o ângulo  $\beta$  e calcular o coeficiente de atrito estático partícula-partícula ( $AE_{pp}$ ), cujo valor foi empregado nas simulações referentes à metodologia Lagrangeana.

As medidas do coeficiente de atrito estático partícula-partícula e partícula-parede foram realizadas para partículas livres, isto é, grãos de café verde individuais foram posicionados sobre o plano e a inclinação do mesmo foi variada uniformemente. Também foram feitas medidas destes parâmetros utilizando-se aglomerados de grãos feitos com partículas aderidas umas às outras, conforme ilustrado pela Figura 3.4. A metodologia referente a aderir partículas umas às outras também foi adotada por Härtl e Ooi (2008) ao medir a tensão de cisalhamento para esferas de vidro. Ao colar uma pequena quantidade de partículas umas às outras e uni-las para formar os aglomerados descritos na imagem (Figura 3.4) pretende-se simular o comportamento *bulk* do material e evitar o rolamento na medida do atrito referente ao deslizamento dos grãos.

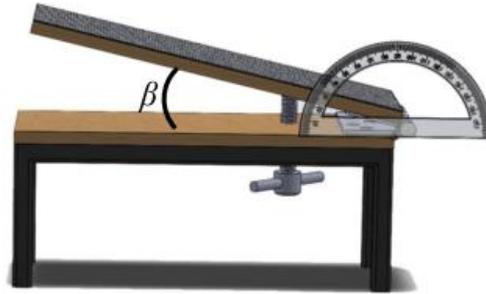


Figura 3.2: Esquema do aparato utilizado para determinar o coeficiente de atrito estático partícula-parede e partícula-partícula (SANTOS, 2015).



(a)



(b)

Figura 3.3: Aparato experimental usado para medir o atrito estático partícula-partícula: (a) vista lateral; (b) vista superior – camada de partículas aderida a superfície do plano de inclinação variável.



Figura 3.4: Aglomerados de partículas de café verde.

Vale ressaltar que para os grãos de café torrado mediou-se o coeficiente de atrito entre as partículas e a parede utilizando-se apenas os grãos livres.

Outra medida feita para ser utilizada como parâmetro nas simulações com uso do método Lagrangeano foi a do coeficiente de restituição ( $e_{ss}$ ). Define-se o coeficiente de restituição como uma relação entre a quantidade de energia cinética que existe antes e depois da colisão entre dois corpos, podendo ser calculado com a aplicação da Equação 3.3. Tal equação expressa a perda de energia causada pela colisão por meio da relação entre as velocidades antes ( $v_0$ ) e após ( $v$ ) o choque do material particulado com uma chapa que representa uma esfera de raio infinito (FOERSTER *et. al.*, 1994).

$$e_{ss} = \sqrt{\frac{v}{v_0}} \quad (3.3)$$

Para realizar a medida do coeficiente de restituição, foi necessário utilizar o dispositivo apresentado na Figura 3.5. Acoplada a parte superior do dispositivo de lançamento, havia uma bomba de vácuo. Dessa forma, quando o vácuo era interrompido, a partícula era abandonada em queda livre, a partir da posição indicada pelo item 1 na imagem, para colidir diretamente com a chapa de aço inox, com espessura correspondente à do tambor rotatório em estudo. Com o auxílio da câmera de alta velocidade (modelo MotionScope – Redlake Imaging) e análise das filmagens dos testes gravados a uma velocidade de 250 quadros/s era possível calcular a velocidade da partícula antes e após a colisão.

Para evitar o deslocamento lateral das partículas durante a queda e conseguir medidas mais precisas determinou-se a altura inicial de soltura como cinco centímetros. Vale ressaltar que não foram encontrados na literatura valores de coeficiente de restituição para grãos de café verde. Os valores encontrados para os coeficientes de restituição partícula-partícula e partícula-parede foram empregados como parâmetros na simulação Lagrangeana feita com o software EDEM®.



Figura 3.5: Aparato para medida experimental do coeficiente de restituição dos grãos de café.

Outro parâmetro medido experimentalmente foi o módulo de cisalhamento. Seu valor foi obtido por meio de ensaios de compressão feitos com o auxílio do equipamento ilustrado na Figura 3.6. O equipamento determina a força aplicada à partícula e a deformação provocada na mesma pela compressão. Dessa forma, a inclinação da curva que relaciona força e deformação possibilitou calcular o valor do módulo de cisalhamento.



Figura 3.6: Equipamento utilizado para realizar ensaios de compressão para o café verde.

### 3.1.2 Unidade experimental

A unidade experimental utilizada é apresentada na Figura 3.7. Tal unidade possui um tambor de aço inox (item 1) de dimensões: diâmetro de 21,5 cm e comprimento igual a 50 cm. Além disso, tem-se um motor (item 2) de 1710 rpm e um inversor de frequências (item 3), para

controlar a velocidade de rotação do tambor. As paredes frontal e traseira do cilindro são feitas de vidro para possibilitar a visualização do material em seu interior. Destaca-se que como o regime de deslizamento não é desejado para o estudo, a superfície interna do equipamento foi revestida com uma lixa P80 para evitá-lo, uma vez que a maior rugosidade evita o deslizamento e favorece a formação dos regimes de interesse para menores rotações.

Com o auxílio de uma câmera de alta velocidade (velocidade máxima de captura de 2000 frames/s - item 4 da Figura 3.7) pode-se acompanhar o deslocamento das partículas dentro do tambor, bem como o comportamento do leito, os regimes de escoamento e identificar as transições entre os regimes de interesse.



Figura 3.7: Unidade experimental e a câmera de alta velocidade utilizados nos experimentos.

### 3.1.3 Transição entre os regimes de escoamento

A fim de caracterizar a dinâmica do café dentro de um tambor rotatório, utilizando-se de grãos verdes e também torrados, investigou-se a transição entre os seguintes regimes: rolamento-cascadeamento; cascadeamento-catarateamento e catarateamento-centrifugação, representados na Figura 3.8.

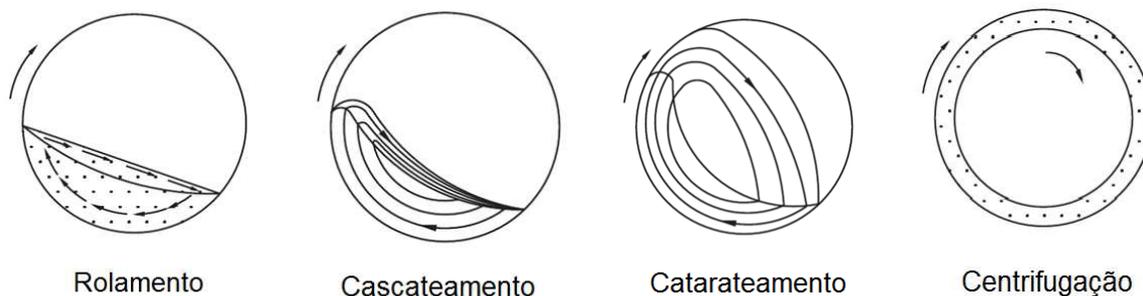


Figura 3.8: Regimes de escoamento cujas transições foram estudadas.

Os enchimentos testados foram de 10, 20, 30, 40 e 50%, em relação ao volume total do cilindro. O valor máximo igual a 50% refere-se a uma limitação experimental, uma vez que industrialmente não é possível carregar os torradores com uma fração de enchimento maior que essa porque as partículas de café passam por uma grande variação de volume durante o processo de torra.

A caracterização dos regimes e a identificação da transição entre eles foram feitas empregando-se uma técnica de análise de imagens. Para tanto, utilizou-se a câmera de alta velocidade (item 4 da Figura 4.7), a uma velocidade de gravação igual a 250 quadros/s.

Dessa forma, para identificar a velocidade crítica de transição entre os regimes alterou-se a velocidade de rotação do tambor de maneira gradativa e seu valor foi monitorado com o auxílio de um tacômetro digital com precisão de  $\pm 0,1$  rpm. Com a câmera, o leito do material particulado dentro do tambor pode ser observado e gravado. A Figura 3.9 apresenta exemplos da metodologia empregada. Na imagem é possível visualizar imagens experimentais dos regimes de rolamento (a), cascadeamento (b) e centrifugação (c).

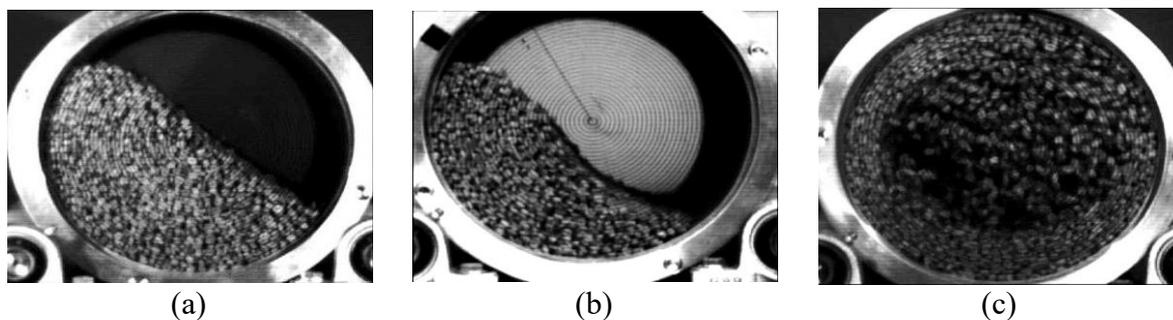


Figura 3.9: Leito de partículas em: (a) rolamento; (b) cascadeamento e (c) centrifugação.

A Equação 3.4 permite calcular a massa de partículas a ser adicionada no interior do tambor rotatório, para cada um dos graus de enchimento correspondentes. Nota-se que para o cálculo dado pela expressão, é preciso conhecer, além das características geométricas do cilindro, o nível de enchimento ( $f$ ) e a porosidade do leito das partículas ( $\varepsilon$ ) e a sua densidade ( $\rho_s$ ).

$$m = \pi R^2 L \rho_s (1 - \varepsilon) f \quad (3.4)$$

O critério adotado para a identificação da transição entre os regimes de escoamento foi visual e as medidas das velocidades críticas de transição foram feitas em triplicatas. É importante esclarecer que considerou-se o início da centrifugação quando apenas a camada mais externa de partículas estava aderida à parede do tambor, de acordo com a definição apresentada por Watanabe (1999).

### 3.1.4 Perfil de velocidade das partículas e espessura da camada ativa

Os perfis de velocidade das partículas para todas as velocidades de rotação estudadas foram obtidos por meio da técnica de análise de imagens gravadas a 500 quadros/s, utilizando a câmera de alta velocidade. Com o auxílio dos softwares *ImageJ* e *Meazure<sup>TM</sup>* foi possível rastrear individualmente as partículas em diferentes quadros. A velocidade é determinada através da subtração das posições da mesma partícula em dois quadros distintos e a posterior divisão pelo intervalo de tempo entre os respectivos quadros. A Figura 3.10 ilustra o posicionamento 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.

A partir destes perfis é possível encontrar a localização da interface entre a camada ativa e a camada passiva, determinada pelo ponto de inversão do sentido de deslocamento dos grãos de café. Ou seja, o ponto com a velocidade de deslocamento das partículas próximo de zero

marca a transição entre as duas regiões. Também se vê na imagem da Figura 3.10 a localização das regiões ativa e passiva.

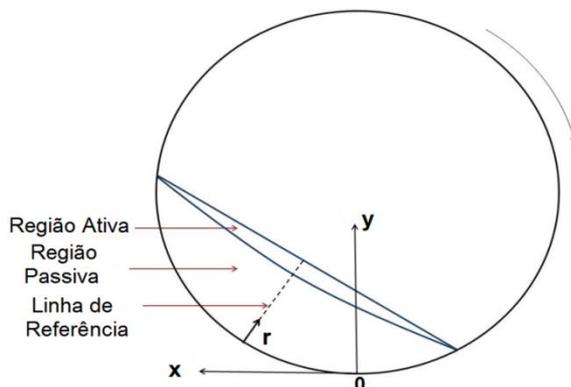


Figura 3.10: Região ativa, região passiva e linha de referência usada na metodologia para calcular os perfis de velocidade das partículas.

Considerando-se a avaliação de todos os graus de enchimento (10, 20, 30, 50 e 50%), as velocidades de rotação do tambor empregadas para obtenção dos perfis de velocidade das partículas foram:

- Café verde: 12, 13, 16 e 18 rpm;
- Café torrado: 12; 15,5 e 18 rpm.

Dessa forma, conhecendo-se a altura do leito de material ao longo da linha de referência, é possível determinar a espessura da camada ativa no regime de rolamento.

Para obter com maior exatidão a localização da interface ativa-passiva levou-se em consideração que, para o caso da partícula em estudo, tanto a camada ativa, quanto a passiva possuem valores de velocidades que variam linearmente com o raio do leito. Assim, as equações das retas para descrever cada uma das regiões foram obtidas e calculou-se o ponto de intersecção entre elas. Este valor foi adotado como ponto de transição entre as camadas.

### 3.1.5 Medida do ângulo de repouso dinâmico ( $\theta_s$ )

Para a realização das medidas dos ângulos de repouso dinâmico do leito também empregou-se a câmera de alta velocidade e uma técnica de análise de imagens. Os vídeos foram

gravados para os grãos de café verde e torrado, com enchimentos do tambor variando de 10 a 50%. Dentro do regime de rolamento, foram testadas três velocidades de rotação do cilindro com o intuito de avaliar o seu efeito sobre o ângulo de repouso, sendo elas: 12, 15 e 18 rpm.

Com o auxílio do software *ImageGrab*<sup>®</sup> obteve-se os *frames* a partir dos vídeos e as imagens do leito de partículas foram analisadas utilizando-se o software *Meazure*<sup>™</sup>. As medidas foram feitas em triplicatas, da maneira como ilustrado pela Figura 3.11.

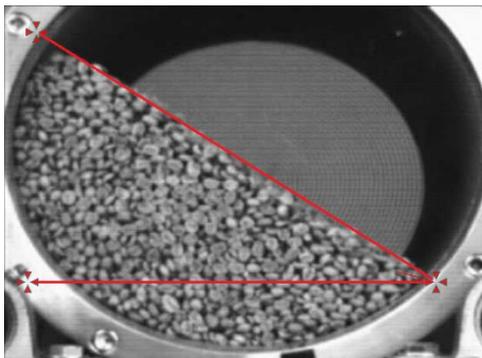


Figura 3.11: Medida experimental do ângulo de repouso dinâmico do leito de grãos de café utilizando-se o software *Meazure*<sup>™</sup>.

## 3.2 Metodologia numérica

### 3.2.1 Metodologia Euleriana

#### 3.2.1.1 Confeção da malha computacional

O primeiro passo para iniciar o estudo numérico a respeito da dinâmica dos grãos de café verde no interior de um tambor rotatório foi a construção da malha computacional sobre a geometria do equipamento. A confeção adequada da malha é uma parte importante para a obtenção de resultados coerentes e de qualidade na simulação, uma vez que a resolução do problema se torna mais eficiente ao se empregar uma malha bem construída. Como a malha computacional discretiza o domínio geométrico onde o problema é resolvido, sua construção pode influenciar na convergência da simulação.

A malha computacional utilizada neste trabalho foi construída com o software GAMBIT® 2.4.6, tendo um total de 310.000 células (ou volumes) e sendo composta por células de formato hexaédrico, sendo classificada como multiblocos tridimensional. A Figura 3.12 contém imagens da malha em questão.

Como nas simulações, assim como os testes experimentais, o tambor operou em regime de batelada, não há regiões de entrada ou saída na malha computacional. Após a definição das paredes e interiores na malha, passou-se à definição dos modelos.

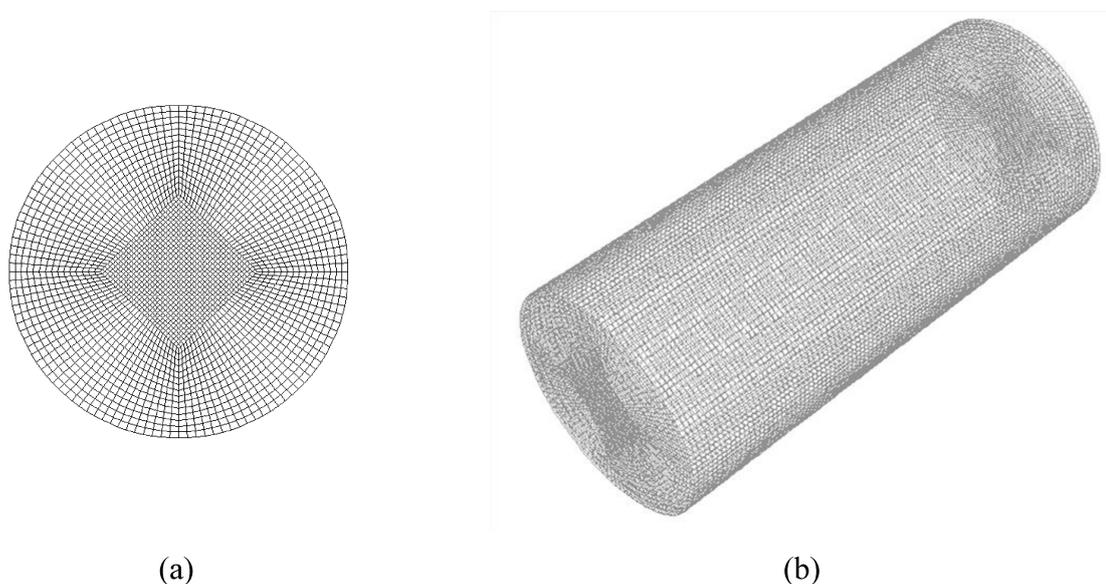


Figura 3.12: Vista frontal (a) e lateral (b) da malha computacional utilizada no estudo de simulação numérica Euleriana.

### 3.2.1.2 Condições numéricas das simulações eulerianas

Todas as simulações utilizando a metodologia Euleriana foram feitas com o software Fluent®. O modelo de mistura selecionado foi o Euleriano Granular Multifásico. Para a viscosidade granular utilizou-se o modelo de Syamlal *et al.* (1993). Para a viscosidade granular *bulk*, a pressão de sólidos e a função de distribuição radial empregaram-se os modelos de Lun *et al.* (1984).

Já os métodos aplicados à resolução numérica de todos os casos estudados estão apresentados na Tabela 3.1.

O tempo simulado foi determinado para atingir condições de fluxo do leito estabilizadas. Para todas as simulações, o coeficiente de restituição dos grãos de café verde ( $e_{ss}$ ) foi mantido constante e igual a 0,90.

Tabela 3.1: Métodos numéricos aplicados nas simulações em CFD.

Método de discretização	Método dos volumes finitos
Acoplamento pressão- velocidade	Algoritmo SIMPLE
Método de discretização temporal	Euler de 1ª ordem implícito
Método de discretização espacial	Up-Wind de 1ª ordem
Critério de convergência	$1 \times 10^{-3}$
Passo de tempo ( <i>time step</i> )	$1 \times 10^{-4}$ segundos
Tempo simulado	20 segundos

Em sequência serão descritas as condições de contorno na parede que foram avaliadas neste estudo: condição de não deslizamento e diferentes valores de coeficiente de especularidade.

### 3.2.1.3 Condições de contorno na parede

Para avaliar a influência da parede no escoamento dos sólidos testaram-se duas condições de contorno para esta região.

Primeiro foram avaliados diferentes valores de coeficiente de especularidade, que segundo a definição deste parâmetro, devem estar na faixa entre 0, caracterizando uma parede lisa e permite livre deslizamento das partículas, e 1, condição de parede rugosa e oposição máxima ao deslizamento. Essa condição de contorno deve ser aplicada juntamente com a condição de malha móvel, na qual a malha se move a uma velocidade de rotação constante e a

posição das células computacionais é atualizada para acompanhar o movimento de rotação do cilindro.

As condições operacionais utilizadas nas simulações em que foram testados diferentes valores de coeficiente de especularidade para todos os níveis de enchimento estudados estão listadas na Tabela 3.2. A velocidade de rotação do tambor igual a 12,5 rpm encontra-se na faixa do regime de rolamento e foi escolhida para permitir a comparação entre os resultados referentes aos perfis de velocidade das partículas experimentais com os dados obtidos pelas simulações.

Tabela 3.2: Condições operacionais das simulações para os diferentes valores de coeficientes de especularidade testados.

<b>Enchimento do Tambor (%)</b>	<b>Coefficiente de Especularidade</b>	<b>Velocidade de Rotação (rpm)</b>
10		
20	0,01	
30	0,1	12,5
40	1	
50		

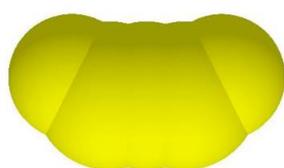
Posteriormente testou-se também, para todos os enchimentos, a condição de contorno de não deslizamento na parede (“*no slip*”). Esta condição considera a adesão do material granular à parede, ou seja, na região de contato entre a fase sólida e o contorno, não há movimento relativo. Para esta condição de contorno definiu-se um valor de velocidade de rotação para os limites de contorno referentes à parede do tambor, portanto, a malha computacional não girava. Da mesma forma, avaliou-se a condição de não deslizamento para todos os níveis de enchimento do tambor à mesma velocidade de rotação.

### 3.2.2 Metodologia Numérica Lagrangeana

As simulações Lagrangeanas deste trabalho foram feitas com o software EDEM®, versão 3.1.

Inicialmente, para considerar a forma irregular da partícula de café, montou-se por meio de um aglomerado de cinco esferas, denominado *clump*, a representação de um grão de café verde. O *clump* é definido como um conjunto de esferas sobrepostas umas às outras, que age como um único corpo rígido com contornos deformáveis (SHAMSI E MIRGHASEMI, 2012).

Na Figura 3.13 é possível visualizar a partícula (a) criada para representar na simulação o grão de café real, mostrado ao lado (b).



(a)



(b)

Figura 3.13: (a) *Clump* de esferas representando o café verde na modelagem DEM  
(b) grão de café verde.

O estudo utilizando a metodologia DEM deste trabalho tem por objetivo realizar uma calibração dos parâmetros relevantes para a movimentação de partículas em tambores rotatórios. Como não encontrou-se disponível na literatura informações referentes aos parâmetros necessários para desenvolver as simulações, estes parâmetros foram medidos experimentalmente de acordo com a metodologia apresentada nos itens anteriores (3.1.3), sendo eles: coeficiente de restituição partícula–parede, módulo de cisalhamento e os coeficientes de atrito estático.

Em sequência, criou-se um Planejamento experimental do tipo Composto Central (PCC) com o intuito de encontrar a melhor combinação entre os seguintes parâmetros que foram variados: coeficiente de atrito estático partícula-partícula ( $AE_{pp}$ ), coeficiente de atrito estático partícula-parede ( $AE_{pw}$ ), coeficiente de atrito de rolamento partícula-partícula ( $AR_{pp}$ ), coeficiente de atrito de rolamento partícula-parede ( $AR_{pw}$ ). Os outros parâmetros também obtidos de forma experimental foram mantidos constantes.

O PCC criado com as quatro variáveis ( $AE_{pp}$ ,  $AE_{pw}$ ,  $AR_{pp}$ ,  $AR_{pw}$ ) e duas réplicas no ponto central resultou em um total de 26 simulações. As condições operacionais para todas elas foram: velocidade de rotação do cilindro de 12,5 rpm e enchimento do tambor de 30% , totalizando uma quantidade de 20.412 partículas geradas.

Os parâmetros que foram mantidos constantes e idênticos às suas medidas reais assim como as condições empregadas no software EDEM® estão listadas na Tabela 3.3 abaixo. O tempo simulado foi definido de acordo com a condição estável para o regime de rolamento no interior do tambor e também considerando-se o custo computacional, ou seja, quanto tempo as simulações demorariam para serem concluídas.

Tabela 3.3: Condições e parâmetros empregados na simulação Lagrangeana.

Módulo de Cisalhamento	$5 \times 10^6$ Pa
Coeficiente de restituição (partícula-parede)	$0,59 \pm 0,02$
Coeficiente de restituição (partícula-partícula)	$0,5 \pm 0,02$
Razão de Poisson	0,25
Passo de tempo ( <i>time step</i> )	$1,9261 \times 10^{-5}$ segundos
Tempo simulado	11 segundos

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As próximas seções deste trabalho estão destinadas à apresentação dos resultados obtidos por meio dos testes experimentais que foram realizados (seção 4.1) e também das simulações numéricas empregando as metodologias Lagrangeana e Euleriana (seção 4.2).

### 4.1 Resultados Experimentais

#### 4.1.1 Caracterização do material

A Tabela 4.1 a seguir apresenta as propriedades das partículas utilizadas neste estudo, sendo  $\rho_s$  a densidade real,  $d_{50}$  o diâmetro médio,  $\varepsilon$  a porosidade do leito de partículas,  $AE_{pw}$  o coeficiente de atrito estático partícula-parede,  $\phi$  a esfericidade média e  $U$  a umidade em base seca.

Tabela 4.1: Propriedades físicas do café verde e do café torrado.

	Café Verde	Café Torrado
$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	1368,3 ± 3,9	656,8 ± 1,9
$d_{50}$ (mm)	5,24	5,86
$\varepsilon$ [-]	0,47 ± 0,01	0,49 ± 0,01
$AE_{pw}$ [-]	0,72 ± 0,02	0,65 ± 0,01
$\phi$ [-]	0,88	0,90
$U$	12,15 ± 0,10	-

Os valores encontrados para densidade real, medida com o picnômetro a gás hélio, estão próximos dos dados encontrados por Cristo *et al.* (2006), sendo que para a densidade do café verde os autores reportaram valores próximos a 1400 kg/m<sup>3</sup> e para o café torrado, valores aproximadamente iguais a 500 kg/m<sup>3</sup>. Ao comparar-se as propriedades de ambas as partículas estudadas, nota-se que a maior diferença entre elas encontra-se exatamente no valor da densidade, uma vez que o café torrado apresenta, para esta propriedade, um valor bastante abaixo do café verde. Tal diferença pode ser justificada pelo fato de que, ao longo da torra o volume dos grãos aumenta enquanto tem-se uma perda de massa devido à emissão de

componentes voláteis para a fase gasosa. Assim, ao final do processo, a densidade dos grãos torrados será menor que a densidade inicial dos grãos verdes.

#### 4.1.2 Transição entre os regimes de escoamento

No presente trabalho foram estudadas as seguintes transições entre os regimes: rolamento-cascadeamento; cascadeamento-catarateamento; catarateamento-centrifugação. Para observação e posterior identificação das transições citadas utilizou-se uma câmera de alta velocidade com velocidade máxima de captura de 2000 quadros/s. Durante os testes, a velocidade de rotação do cilindro era alterada de maneira gradativa e o leito do material em seu interior era observado com o auxílio da câmera, conforme explicitado no item 3.1.3.

Assim, em relação à transição entre os regimes de interesse, a Figura 4.1 contém, para as partículas de café verde e torrado, as curvas de variação do número de Froude ( $Fr$ ), dado pela Equação 2.1, com os diferentes níveis de enchimento empregados.

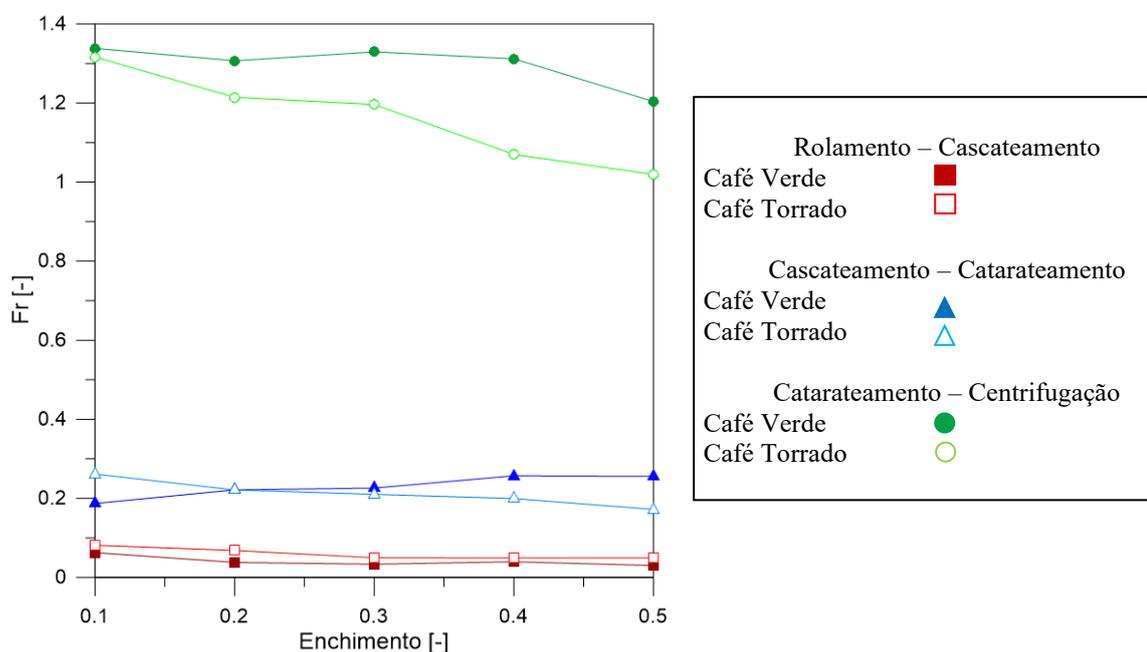


Figura 4.1: Curvas de transição das partículas de café (verde e torrado) para os regimes de escoamento estudados.

Para a transição catarateamento-centrifugação, que aparece na parte superior da Figura 4.1, nota-se uma diferença considerável entre as velocidades necessárias para se atingir a centrifugação quando avaliam-se os dois materiais. Dado um aumento no grau de enchimento, para os grãos de café torrado tem-se velocidades de rotação do tambor decrescentes para esta transição. Para os grãos de café verde, as velocidades também apresentam perfil decrescente, porém com valores maiores em comparação com o material torrado, visto que a densidade deste último é consideravelmente menor. Tais observações estão de acordo com dados encontrados por Watanabe (1999), Mellmann (2001) e mais recentemente Santos (2015), mostrando que quanto maior o enchimento do equipamento, menores são as velocidades necessárias para centrifugar o material em seu interior.

O efeito da densidade sobre a transição entre os regimes foi analisado por Rodrigues *et al.* (2003). Segundo os autores, os grãos com densidades mais baixas supostamente serão mais facilmente impulsionados a partir da posição superior na superfície livre do leito do que aqueles com densidades mais elevadas, promovendo assim a transição de regime a diferentes velocidades de rotação. Neste estudo, o efeito citado foi evidenciado de maneira mais relevante na transição do regime de catarata para a centrifugação.

Tal constatação de que a densidade influenciou significativamente a transição catarateamento-centrifugação está de acordo com o trabalho de Juarez *et al.* (2011), uma vez que os autores propuseram uma expressão para previsão da velocidade crítica de centrifugação que contempla, como uma de suas variáveis, a densidade do sólido (Equação 2.6).

Ainda referente à centrifugação, levando em consideração os grãos verdes, os valores de velocidade crítica de transição para este regime conforme apresentados na Figura 4.1 são bastante próximos aos encontrados por Cristo *et al.* (2006). É possível concluir isto pela comparação entre as curvas de transição do presente estudo com os dados obtidos pelos pesquisadores citados. Uma vez que o tambor rotatório utilizado pelos autores possui diâmetro igual a 22,0 cm e o cilindro empregado neste trabalho tem diâmetro de 21,5 cm e o número de Froude ( $Fr$ ), parâmetro apresentado nos gráficos juntamente com o grau de enchimento, depende do raio do tambor, da aceleração da gravidade e da velocidade de centrifugação, a comparação é justificada.

Em relação às outras duas transições (rolamento-cascadeamento e cascadeamento–catarateamento) não se observou efeito pronunciado do enchimento na variação do número de Froude. Apesar de que, para a transição do cascadeamento para o catarateamento, entre os enchimentos de 20 e 30% tem-se uma pequena variação do número de Froude, alterando o posicionamento das curvas de transição do café torrado e do café verde. Tal inversão entre as curvas começa a exibir a influência da densidade na transição entre os regimes, que torna-se explícita ao se atingir a centrifugação. Mais especificamente a respeito da transição do regime de rolamento para o de cascadeamento, verifica-se grande semelhança entre as velocidades de transição para as duas partículas estudadas.

No trabalho realizado por Cristo *et al.* (2006), os autores concluíram que os efeitos das mudanças das propriedades dos grãos de café devido a torra neutralizam o efeito do grau de enchimento. Essa combinação de efeitos é capaz de justificar a similaridade entre as curvas de transição entre rolamento-cascadeamento e cascadeamento-catarateamento para os grãos verdes e torrados.

### **4.1.3 Ângulo de repouso dinâmico ( $\theta_s$ )**

De acordo com a definição do regime de rolamento, o leito do material em escoamento no interior do tambor rotatório apresenta uma inclinação constante, denominada ângulo de repouso dinâmico das partículas ( $\theta_s$ ). Sua determinação é importante por conter uma indicação do grau de “escoabilidade” do material.

Determinou-se, então, o valor do ângulo de repouso dinâmico para as partículas de café verde e torrado nas velocidades de rotação do tambor de 12, 15 e 18 rpm e para os enchimentos de 10 a 50%. As medidas foram feitas em réplicas e os resultados encontram-se na Figura 4.2.

Nota-se pelos gráficos presentes na Figura 4.2 que a velocidade de rotação do tambor e o grau de enchimento não tiveram influência determinante no valor do ângulo de repouso encontrado. Em consequência, pode-se afirmar que tal ângulo não é fortemente dependente das variáveis citadas (nível de enchimento e velocidade de rotação do cilindro).

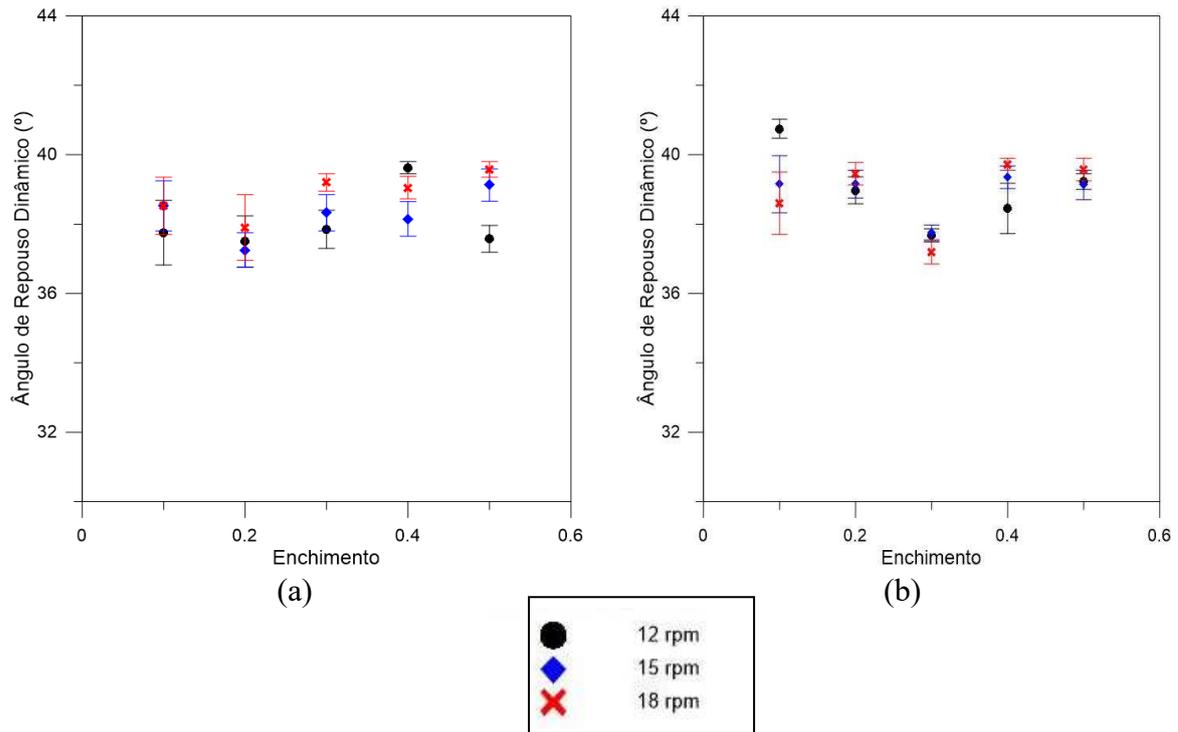


Figura 4.2: Ângulo de repouso dinâmico das partículas de café verde (a) e torrado (b).

Para o café verde, tem-se o menor valor do ângulo igual a  $37,5^\circ$  e o maior,  $39,62^\circ$ . A média para este material foi de  $38,40^\circ$  com desvio de  $\pm 0,65^\circ$ . No caso dos grãos torrados, o menor ângulo é igual a  $37,2^\circ$  e o maior,  $40,70^\circ$ . Além disso, a média para o segundo material foi de  $38,94^\circ$  e o desvio de  $\pm 0,67^\circ$ . Apesar de próximos estes resultados são estatisticamente diferentes ( $p < 0,05$  em um teste usando uma t de Student). Assim o ângulo de repouso do café verde é menor do que o café torrado. Entretanto esta diferença é muito pequena (1,4%) e não é suficiente para alterar significativamente as propriedades de escoabilidade do material ao longo do processo de torrefação.

#### 4.1.4 Perfis de velocidade de partículas

Conforme citado anteriormente (item 2.1.2.1), o regime de rolamento apresenta duas regiões distintas, a camada ativa e a camada passiva. Cada uma destas regiões possui diferentes características e a identificação das mesmas bem como a determinação da espessura da região ativa são de grande relevância, visto que é nesta região em que ocorre a mistura efetiva do

material particulado. Por consequência, como já apresentado por autores como Mellmann (2001), Santos (2015) e Delele *et al.*(2016), na camada ativa tem-se maiores coeficientes de troca de calor, massa e momento entre as partículas.

Dessa forma, este trabalho obteve, tanto para o café verde quanto para o torrado, perfis de velocidade resultante das partículas referentes ao regime de rolamento em diferentes valores de velocidade de rotação do tambor. Variou-se também o grau de enchimento para avaliar-se a influência das duas variáveis (enchimento e velocidade de rotação do cilindro) na espessura da camada ativa.

Inicialmente, apresenta-se a Figura 4.3 contendo perfis de velocidade resultante de grãos de café verde considerando-se o grau de enchimento constante e igual a 10% para as seguintes velocidades de rotação do tambor: 12, 13, 16 e 18 rpm.

Nota-se na Figura 4.3 que todos os perfis encontrados possuem comportamento semelhante. Como todas as velocidades testadas encontram-se no regime de rolamento, é possível identificar a presença das duas regiões: ativa e passiva. Para a posição mais próxima da parede do equipamento [posição do raio( $r$ ) aproximadamente igual a zero em relação à linha de referência], tem-se as partículas deslocando-se com valor de velocidade muito próximo à de rotação do tambor. Com o aumento da posição radial, essa velocidade passa a decrescer, até atingir um valor mínimo, próximo a zero, marcando o ponto de inversão do sentido de deslocamento do material particulado e o final da camada passiva. A partir daí, para maiores posições radiais, a velocidade de deslocamento das partículas passa a aumentar, caracterizando a camada ativa. Assim, os maiores valores de velocidades estão localizados próximos à superfície do leito na camada ativa.

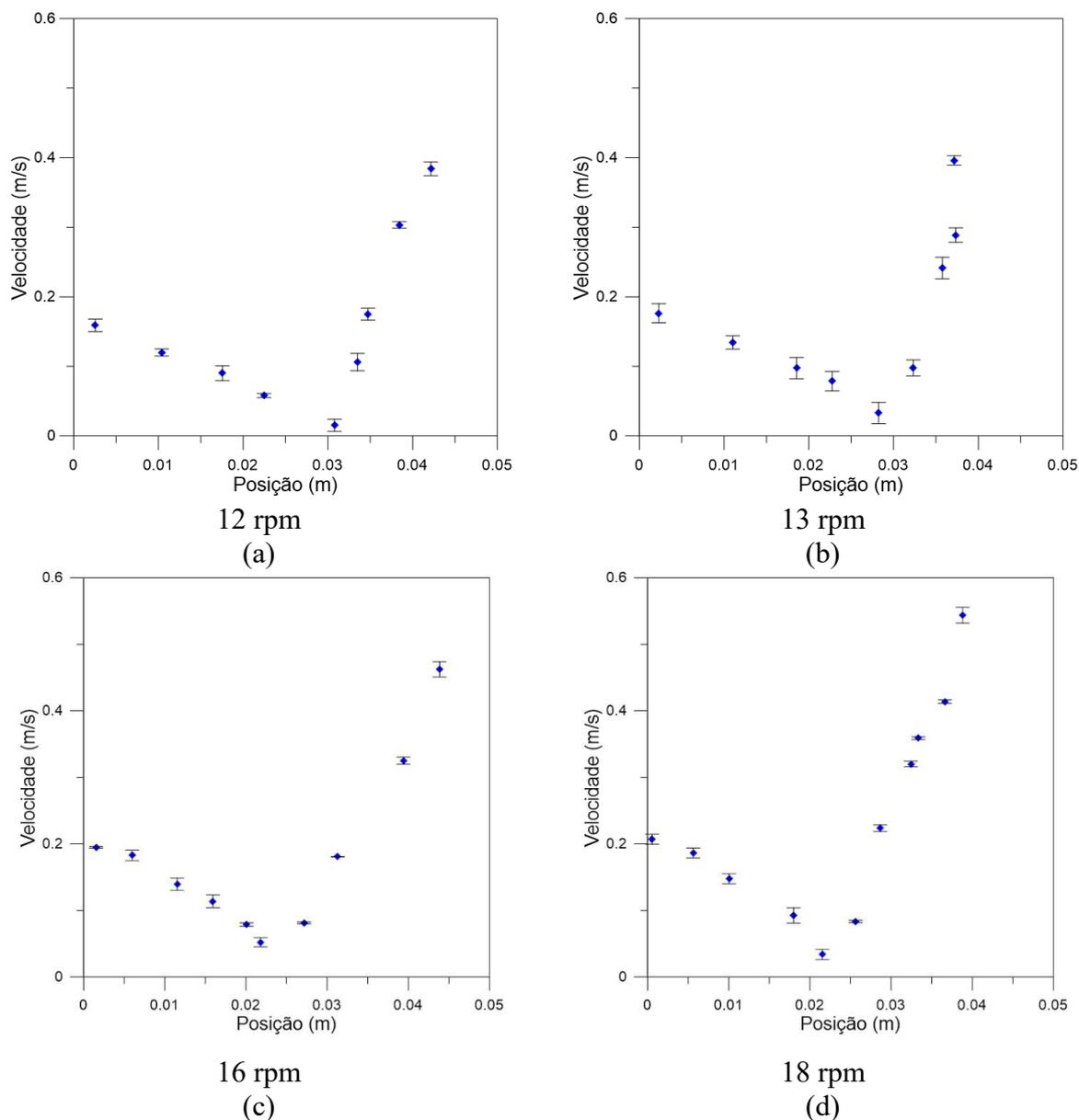


Figura 4.3: Perfil de velocidade resultante dos grãos de café verde para as velocidade de rotação do tambor: (a) 12 rpm; (b) 13 rpm; (c) 16 rpm; (d) 18 rpm.

Para melhor analisar o efeito da velocidade do tambor rotatório na espessura da camada ativa, a Tabela 4.2 apresenta os dados obtidos alterando-se o grau de enchimento e a rotação do tambor. 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 na espessura da camada ativa 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%). Dessa

forma, confirma-se que o aumento velocidade de rotação leva também a um acréscimo na espessura da camada ativa.

Ainda de acordo com a Tabela 4.2, 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 camada ativa igual a 79,75%. Para a velocidade de 13 rpm e considerando-se a mesma variação no grau de enchimento, este aumento da espessura é de 73,41%. Já para a velocidade de rotação do cilindro igual a 16 rpm, a variação da espessura da camada ativa vale 77,47% e para 18 rpm, o aumento da espessura é de 73,97%. 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.

Tabela 4.2: 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

Com relação aos testes para o café torrado, apresenta-se a Figura 4.4. Nesta figura, tem-se os perfis de velocidade de partículas dada uma velocidade de rotação do tambor constante de 15,5 rpm e frações de enchimento variáveis iguais a 10, 20, 30, 40 e 50%.

Da mesma forma como encontrado na Figura 4.3, nos gráficos da Figura 4.4, observam-se perfis de velocidade com comportamento semelhante ao citado anteriormente, isto é, presença das regiões ativa e passiva e ponto de inversão do sentido de deslocamento dos grãos de café. Também é possível notar pelos gráficos da Figura 4.4, para graus de enchimento crescentes, pontos de inversão crescentes assim como a espessura do leito. Para melhor

exemplificar este efeito do aumento do enchimento do tambor rotatório na espessura da camada ativa, apresenta-se a Tabela 4.3.

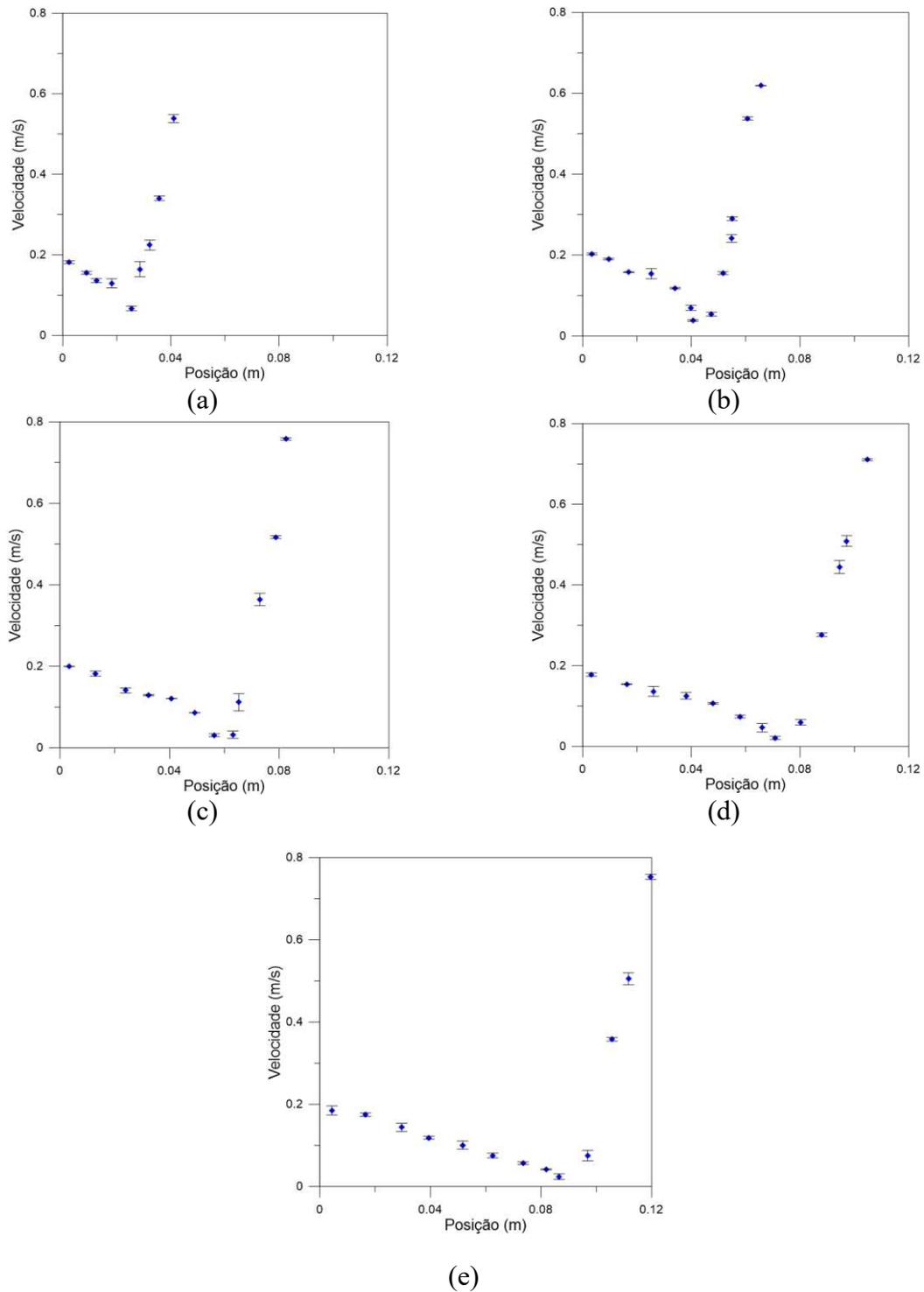


Figura 4.4: Perfil de velocidade dos grãos de café torrado para a velocidade de rotação do tambor igual a 15,5 RPM e os enchimentos: (a) 10%; (b) 20%; (c) 30 %; (d) 40 %; (e) 50%.

Tabela 4.3: Variação da espessura da camada ativa com o enchimento e velocidade de rotação do tambor para o café torrado.

Enchimento do Tambor (%)	Espessura da Camada Ativa (cm)		
	Velocidade de Rotação do Tambor		
	12 rpm	15,5 rpm	18 rpm
10	1,23 ± 0,10	1,85± 0,05	1,90 ± 0,07
20	2,09 ± 0,06	2,11± 0,05	2,54 ± 0,01
30	2,42 ± 0,05	2,49± 0,01	2,85 ± 0,03
40	2,65 ± 0,03	2,81± 0,04	2,96 ± 0,04
50	2,62 ± 0,06	3,12± 0,08	3,08± 0,04

De acordo com os dados da Tabela 4.3 do menor enchimento, igual a 10%, para o maior, 50 % e para uma velocidade de rotação do equipamento igual a 12 rpm há um aumento de 113 % na espessura da camada ativa. Já para a velocidade de 15,5, o aumento é de 68,65% e para 18 rpm, tem-se 62,10% de aumento da espessura da camada ativa. Assim, comprova-se novamente a influência da fração de enchimento na espessura desta camada.

Ainda por análise da Tabela 4.3, considerando-se uma ordem crescente do nível de enchimento do tambor e variando-se a velocidade de rotação do mesmo de 12 rpm para 18 rpm, tem-se um aumento na espessura da camada ativa de: 54,47% (enchimento de 10%), 21,53% (enchimento de 20%), 17,76% (enchimento de 30%), 11,70% (enchimento de 40%) e 17,55% (enchimento de 50%). Novamente, observa-se que a rotação do cilindro tem influência sobre a espessura da camada ativa.

Em resumo, os gráficos contidos na Figura 4.5 a seguir demonstram os efeitos da velocidade de rotação do tambor e do grau de enchimento do equipamento sobre a espessura da camada ativa. Para os grãos de café verde e torrado estão apresentados todos os enchimentos e velocidades utilizados nos testes experimentais. Observa-se nesta figura que o efeito da velocidade de rotação do tambor sobre a região ativa mostrou a mesma tendência tanto para os grãos verdes quanto para os torrados, isto é, um aumento nesta velocidade levou a um aumento da espessura da região ativa. Já a influência do nível de enchimento sobre a espessura da camada

ativa é mais expressiva e também apresentou o mesmo comportamento para os grãos de café verde e torrados.

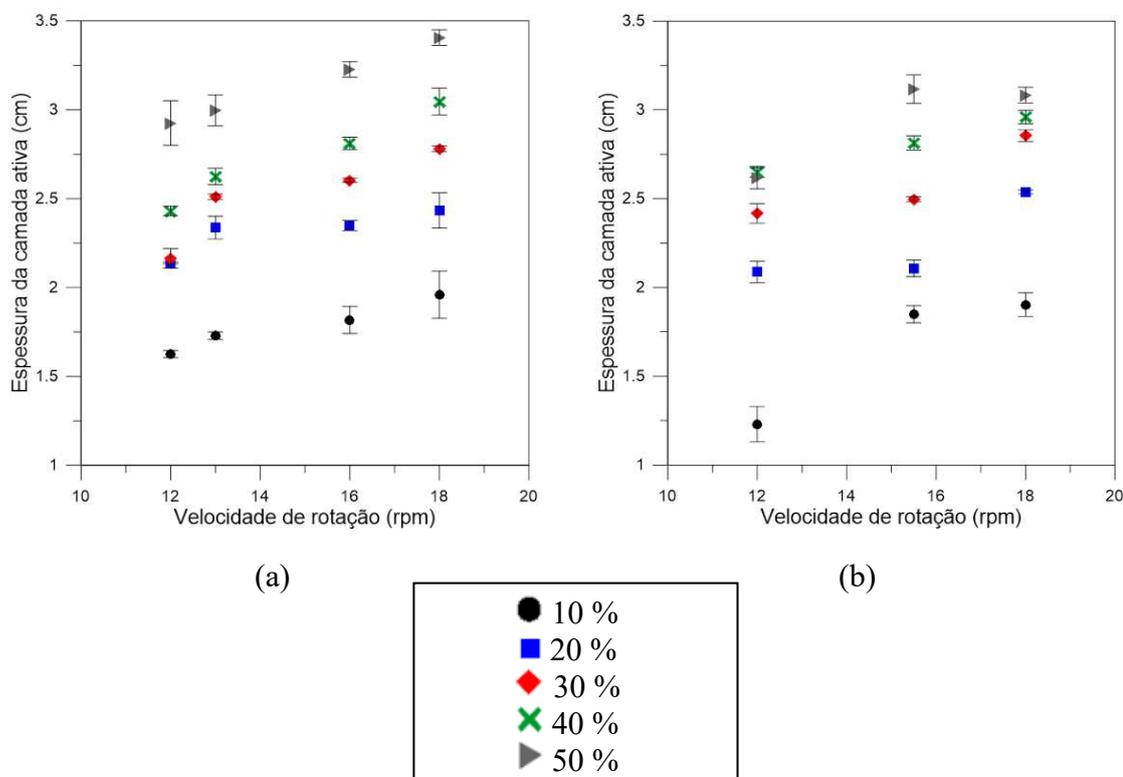


Figura 4.5: Variação da espessura da camada ativa com a velocidade de rotação do tambor e com o grau de enchimento para: (a) café verde; (b) café torrado.

#### 4.1.5 Comparação entre as partículas de café verde e café torrado

A seguir, será descrita na Figura 4.6 a variação da espessura da camada ativa devido ao aumento da velocidade de rotação do tambor, de todos os enchimentos avaliados, para o café verde e também torrado. Com isso, realiza-se uma comparação do comportamento dos grãos de café antes e depois da passagem pelo processo de torra.

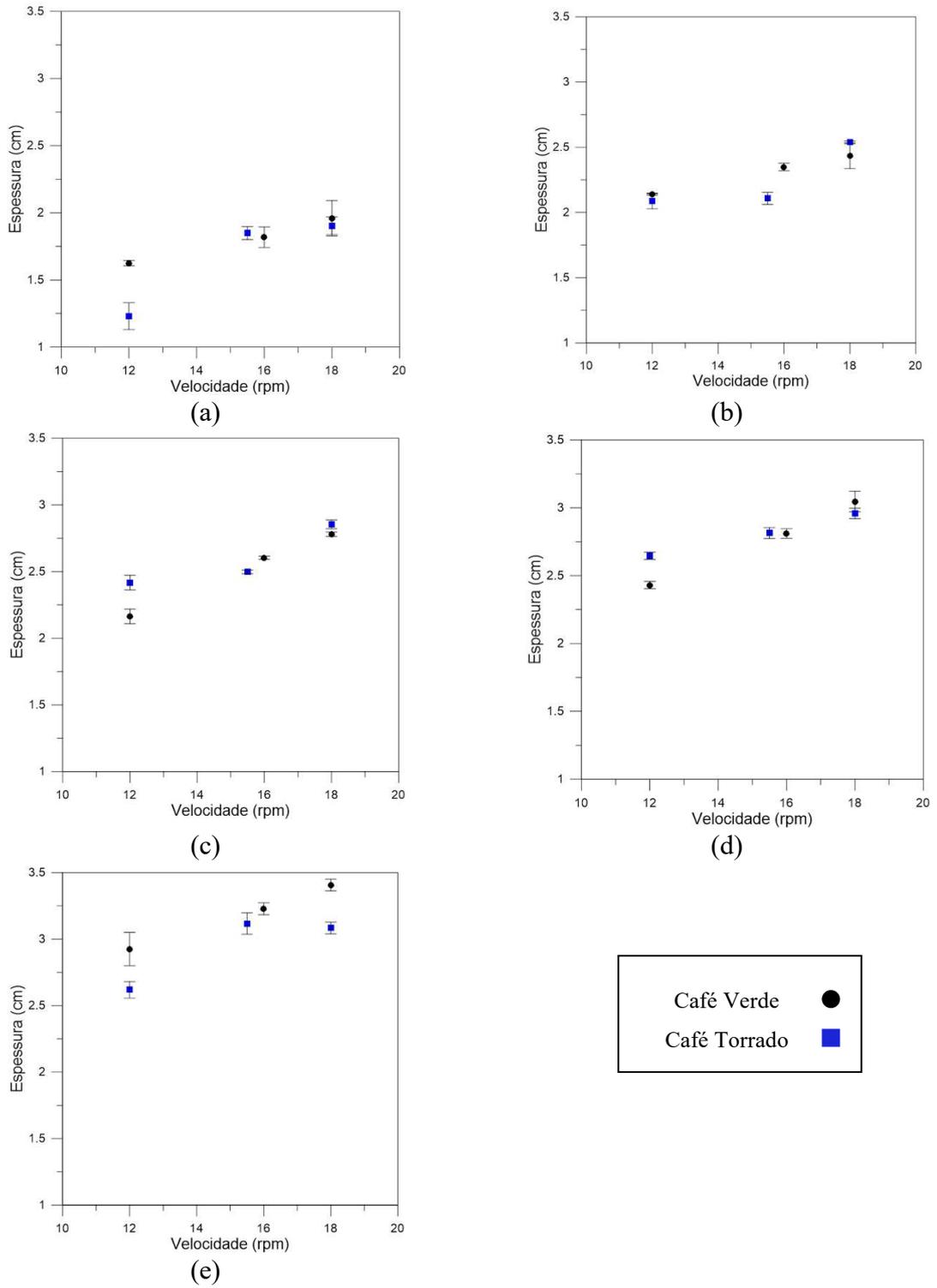


Figura 4.6: Comparação da espessura da camada ativa entre o café verde e o café torrado para os enchimentos: (a) 10%; (b) 20%; (c) 30 %; (d) 40 %; (e) 50%.

É possível notar pelos gráficos (Figura 4.6) uma grande semelhança para os valores de espessura da camada ativa para os dois materiais avaliados. A Tabela 4.4 faz uma comparação percentual da diferença entre os dados do café verde e do café torrado nos pontos em que a velocidade é igual para ambos (12 rpm e 18 rpm).

Tabela 4.4: Variação percentual da espessura da camada ativa entre os valores para o café verde e o café torrado.

<b>Enchimento do Tambor (%)</b>	<b>Variação da Espessura da Camada Ativa – Café Verde e Café Torrado (%)</b>	
	<b>Velocidade de Rotação do Tambor</b>	
	<b>12 rpm</b>	<b>18 rpm</b>
<b>10</b>	24,35	2,85
<b>20</b>	2,40	4,22
<b>30</b>	11,69	2,66
<b>40</b>	8,89	2,87
<b>50</b>	10,50	9,48

A análise da Tabela 4.4 permite concluir que efetivamente existe uma boa semelhança referente à extensão da região ativa para os grãos de café antes e depois de serem torrados. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que, apesar de a variação de densidade entre os materiais ser considerável, os diâmetros das partículas são muito próximos, não ocasionando grandes diferenças na espessura da camada ativa.

Tal constatação pode ser útil para casos em que deseja-se realizar simulações quanto ao processo de torra. Como a espessura da região ativa do leito de café verde e de café torrado, dado um mesmo enchimento, é próxima, essa informação pode ser levada em consideração e os parâmetros referentes à simulação podem ser simplificados.

Entretanto, é importante destacar que os torradores, normalmente, operam em regime de batelada. Dessa forma, como os grãos passam por uma mudança no volume, o grau de enchimento dentro do tambor se altera. O comprimento da camada ativa no regime de rolamento

para grãos de café torrado deve ser menor do que para os grãos verdes, devido ao nível de enchimento do tambor ser maior no início da torrefação do que no final (CRISTO *et al.* 2006).

## **4.2 Resultados de Simulação**

### **4.2.1 Metodologia Euleriana**

#### **4.2.1.1 Análise das condições de contorno na parede - coeficiente de especularidade**

Este trabalho avaliou diferentes condições de contorno para estudar numericamente a dinâmica de grãos de café verde em escoamento dentro de um tambor rotatório. Inicialmente, foram testados diferentes valores de coeficientes de especularidade, na tentativa de descrever de maneira adequada o comportamento das partículas e suas interações entre si e com a parede do equipamento.

Em sequência, apresenta-se uma análise qualitativa dos resultados numéricos obtidos para os coeficientes de especularidade testados, sendo iguais a 0,01; 0,1 e 1. A Figura 4.7 contém a distribuição resultante da fase sólida para planos localizados na parede frontal do tambor rotatório e também transversalmente na metade do comprimento do mesmo. Na figura em questão tem-se os resultados simulados para as frações de enchimento do cilindro iguais a 20% e 40%, respectivamente, e a velocidade de rotação do tambor é de 12,5 rpm, bem como imagens do experimento nas mesmas condições.

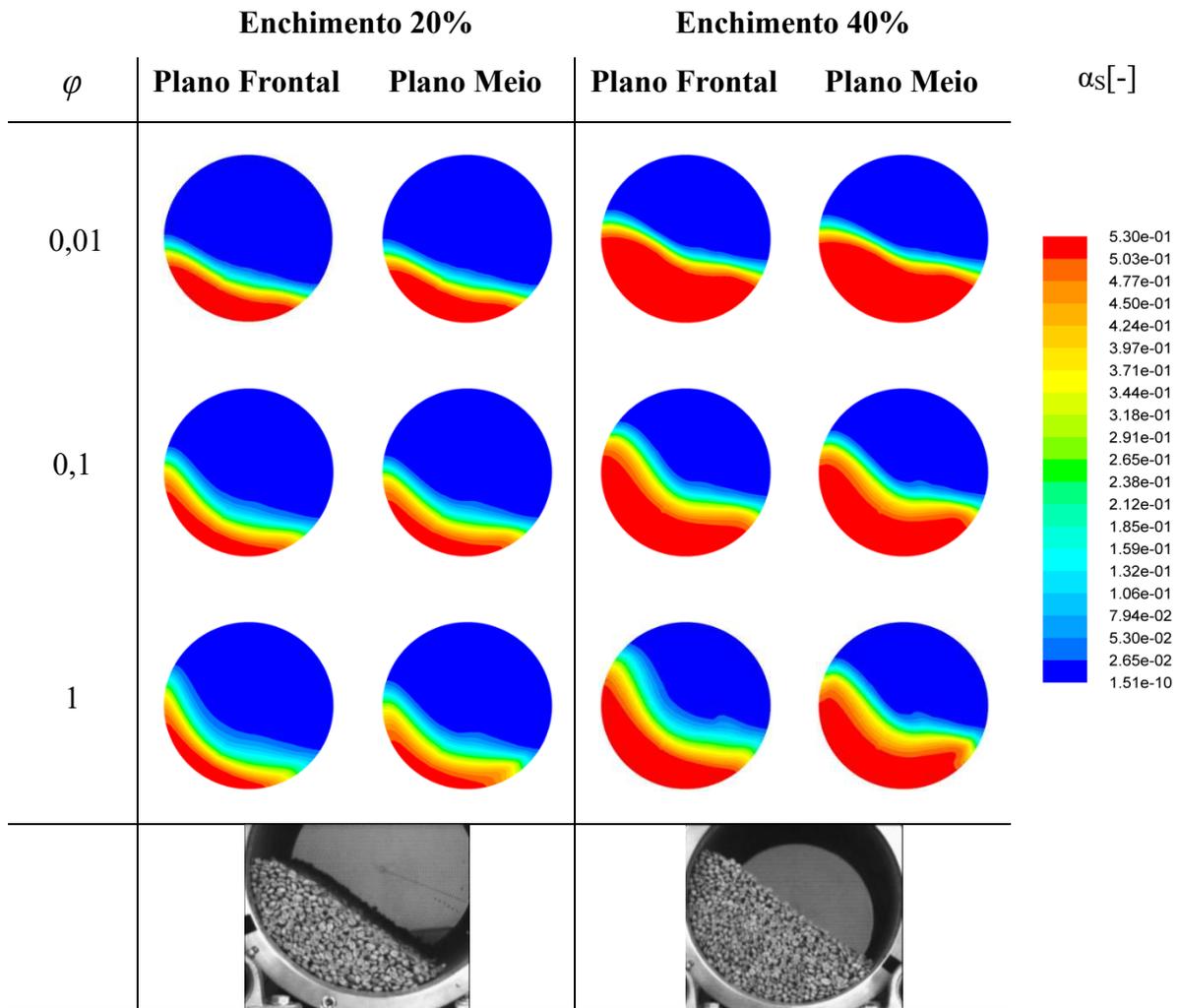


Figura 4.7: Frações volumétricas de sólidos observadas experimental e numericamente para diferentes valores de coeficiente de especularidade durante o regime de rolamento (12,5 rpm).

Avaliando-se a Figura 4.7, nota-se que para o enchimento menor, 20%, o coeficiente de especularidade de 0,01 reproduz numericamente um comportamento do leito que mais se assemelha ao real, cuja imagem ilustrativa encontra-se na parte inferior da figura. Em relação aos demais coeficientes testados (0,1 e 1), verifica-se que com o aumento dos valores deste parâmetro ocorre uma deformação crescente na superfície do leito de material, afastando-se do comportamento observado no teste experimental. Essa deformação acontece de forma mais pronunciada para o enchimento maior, igual a 40%. Da mesma forma, para o enchimento mais elevado, o coeficiente igual a 0,01 apresentou melhor concordância com a imagem experimental.

Para o maior coeficiente de especularidade testado,  $\varphi = 1,0$ , que representa a condição de parede rugosa e configura não deslizamento entre o contorno e o material sólido, a parede carrega as partículas até maiores alturas. Este efeito fica evidente ao comparar as imagens do menor coeficiente avaliado ( $\varphi = 0,01$ ) com o maior valor testado, igual a 1. Ao serem carregadas para maiores alturas, observa-se uma maior deformação do leito e isso acontece de maneira progressiva com o aumento dos valores de coeficientes de especularidade empregados.

Boateng (1993) descreveu experimentalmente o efeito causado pelas paredes terminais que carregam as partículas mais próximas a elas a uma altura maior que do restante do leito de material. Machado (2016) também observou o mesmo efeito em seu trabalho de simulação, ao estudar o coeficiente de especularidade como condição de contorno para tambores rotatórios com corpos moedores com suspensores. Entretanto, a autora não relatou o efeito das paredes em seus resultados experimentais, somente nas simulações.

Ao comparar a distribuição de sólidos obtida pelas simulações no plano frontal e no plano posicionado no meio do comprimento do tambor, nota-se diferença entre o comportamento da fase sólida apenas para o coeficiente de especularidade igual a 1. Ou seja, o efeito da parede só foi evidenciado para altos valores deste parâmetro. Para baixos valores de especularidade, não se observa este efeito, já que a distribuição da fase sólida na parede e no plano no meio são praticamente coincidentes.

Além da análise qualitativa, apresenta-se também uma avaliação quantitativa dos dados obtidos pela simulação empregando-se os coeficientes de especularidade. Na Figura 4.8 encontram-se gráficos de perfil de velocidade de partículas experimentais juntamente com os resultados da simulação numérica.

É possível visualizar pela Figura 4.8 que o comportamento apresentado pelas curvas geradas usando-se os coeficientes de especularidade, como condição de contorno na parede, não reproduzem em sua totalidade os dados experimentais de velocidade dos grãos de café verde em função da posição.

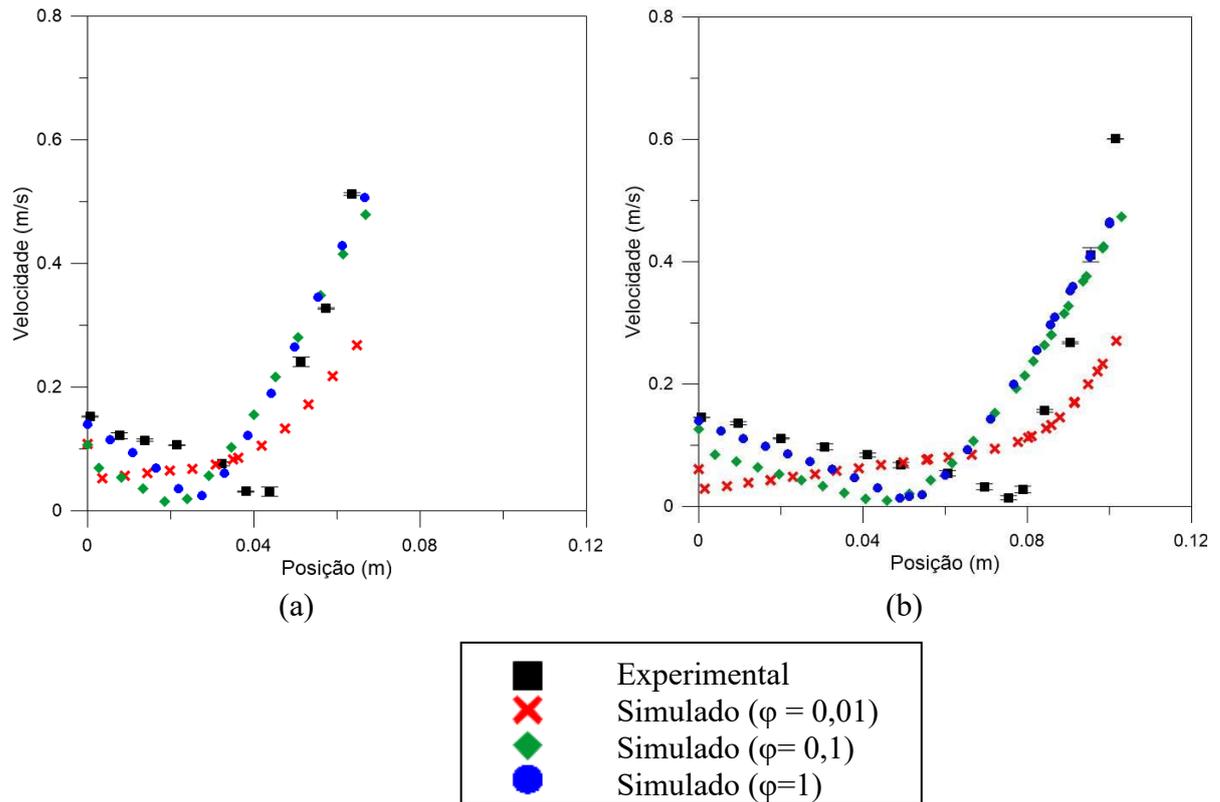


Figura 4.8: Perfil de velocidade das partículas de café verde experimental e simulado para os diferentes valores de coeficiente de especularidade testados com graus de enchimento de: (a) 20% e (b) 40%.

Para ambos os enchimentos mostrados, nota-se que para todos os coeficientes analisados, a transição da camada passiva para a ativa encontra-se em posições radiais menores do que as obtidas pelos resultados experimentais. Nestes casos, o ponto onde o sentido do deslocamento das partículas inverte-se é subestimado pelo modelo. Isto é verificado de forma mais acentuada para o menor valor de coeficiente de especularidade estudado ( $\varphi=0,01$ ), o que justifica-se pelo maior deslizamento na parede, caracterizado por esta condição.

Além disso, vê-se na Figura 4.8 que com o aumento do enchimento, o comportamento mostrado pelos coeficientes de especularidade mais altos ( $\varphi=0,1$  e  $1$ ) na região passiva torna-se cada vez mais semelhante. Tal semelhança é observada para a região ativa em ambos os enchimentos mostrados. Apesar de haver uma grande diferença entre os valores destes dois coeficientes testados, os resultados apresentados por eles são bastante similares, sugerindo que

simulações feitas com valores de coeficientes de especularidade na faixa entre eles não resultaria em informações diferentes.

Diferentemente das constatações descritas anteriormente neste tópico, o trabalho de Machado (2016) encontrou uma faixa para valores de coeficiente de especularidade que resultaram em simulações coerentes com as observações experimentais por meio de análises qualitativas. O tambor utilizado pela autora continha suspensores internamente e mostrou-se mais sensível às condições de contorno do que o equipamento sem suspensores utilizado neste estudo. Em relação à resolução numérica das simulações, isto pode ter ocorrido pois com a presença dos suspensores tem-se uma maior extensão de regiões de parede. Além disso, quando há suspensores no interior dos tambores a condição de contorno se aplica aos mesmos e existem outras forças atuando sobre as partículas, devido ao contato com os suspensores, que com a rotação do cilindro promovem o cascadeamento do material particulado.

#### 4.2.1.2 Análise das condições de contorno – não deslizamento

Uma vez que o modelo empregando as condições de contorno com uso dos coeficientes de especularidade não gerou resultados satisfatórios para descrever a dinâmica das partículas de café dentro do tambor rotatório, fez-se uma alteração nas condições de contorno na parede. Procedeu-se, assim, a utilização da condição de contorno denominada “*no slip*” ou não deslizamento, caracterizada pela ausência de movimento relativo entre o material particulado e a parede do equipamento simulado.

Foram realizadas simulações com graus de enchimentos do tambor variando de 10 a 50% e serão apresentados os resultados para os níveis de enchimento iguais a 10, 30 e 50% e velocidade de rotação de 12,5 rpm (a mesma usada para os testes com os diferentes coeficientes de especularidade). A Figura 4.9 abaixo contém os perfis simulados de fração volumétrica da fase sólida na parede frontal e no plano traçado na metade do comprimento do tambor.

$f$	Plano Frontal	Plano Meio	Experimental	$\alpha_S[-]$
-----	---------------	------------	--------------	---------------

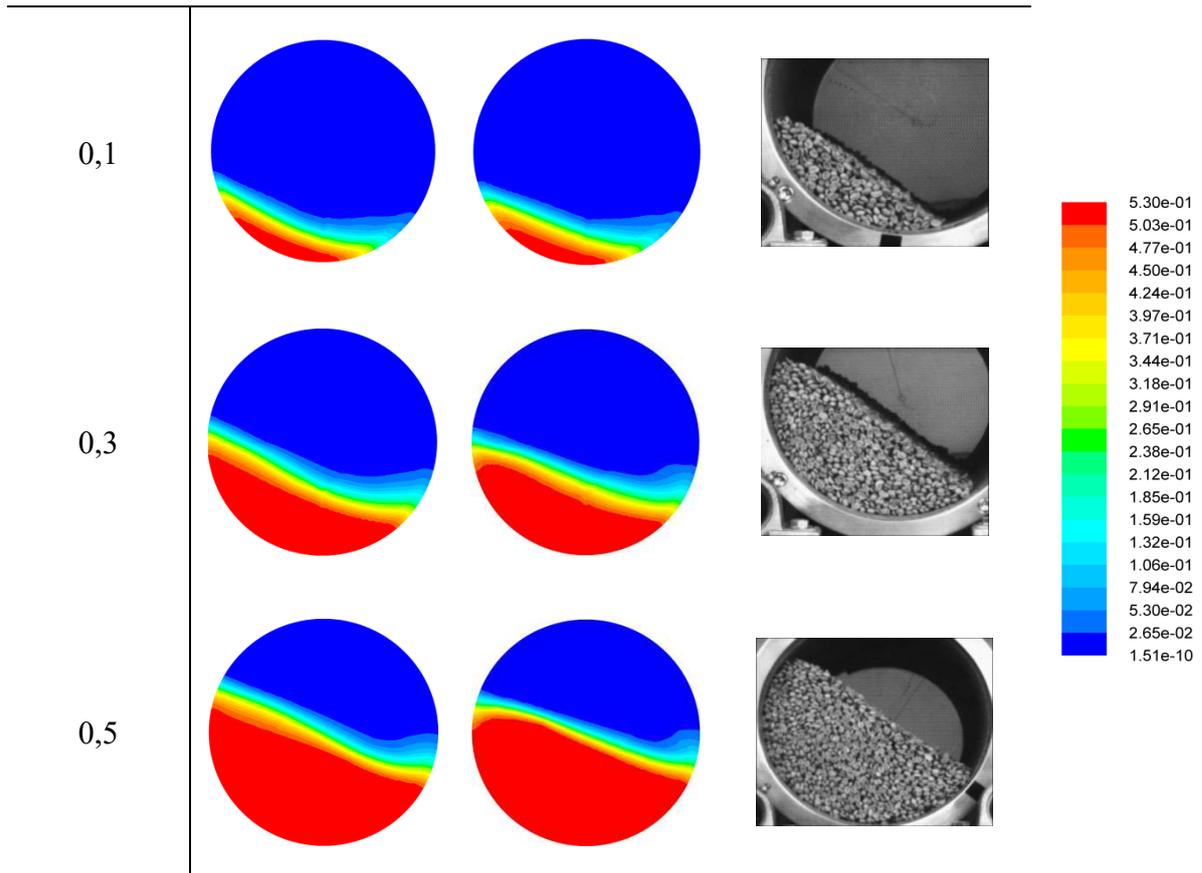
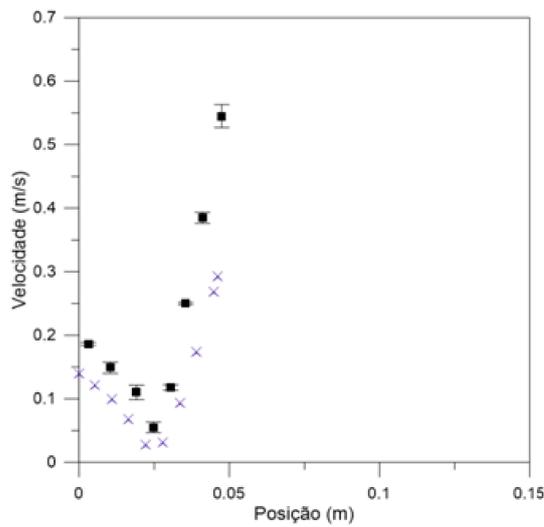
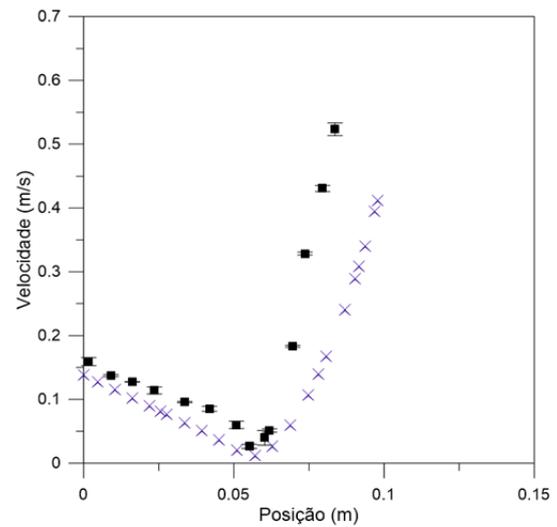


Figura 4.9: Frações volumétricas de sólidos observadas experimental e numericamente para a condição de contorno “no slip” (12,5 rpm).

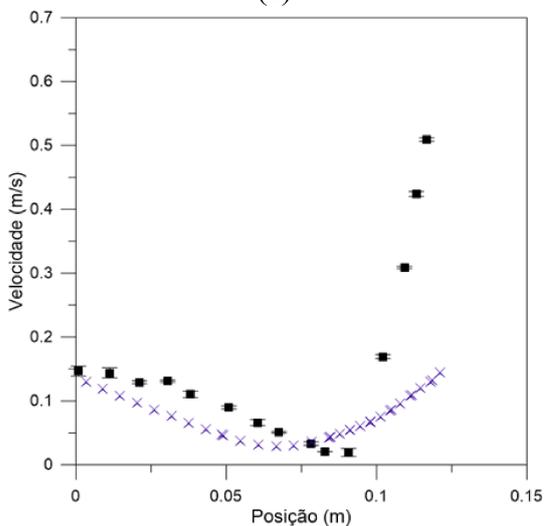
Por meio de uma análise qualitativa da Figura 4.9, nota-se uma semelhança entre os resultados simulados e as imagens experimentais. Entretanto, também avaliou-se os resultados dessa condição de contorno na parede quantitativamente e da mesma forma que para os coeficientes de especularidade, comparou-se os perfis de velocidade das partículas nestas condições de simulação e os dados experimentais. Tal comparação encontra-se na Figura 4.10, onde visualizam-se os perfis de velocidade referentes aos enchimentos do tambor iguais a 10, 30 e 50%.



(a)



(b)



(c)

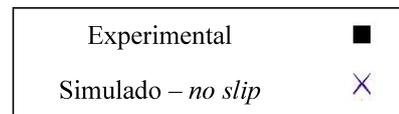


Figura 4.10: Perfil de velocidade das partículas de café verde experimental e simulado para a condição de contorno de não deslizamento (*no slip*) testados com graus de enchimento de: (a) 10% ; (b) 30% e (c) 50%.

Os resultados da simulação mostrados na Figura 4.10 evidenciam dois comportamentos distintos. Em relação à camada passiva, o modelo com a condição de contorno de não deslizamento empregada, foi capaz de reproduzir de maneira mais acertada esta região quando comparada com os resultados simulados dados pelos coeficientes de especularidade como condição de contorno na parede. O modelo com a condição de “*no slip*” também previu de

maneira adequada a posição da interface ativa-passiva, com exceção dos resultados para o maior grau de enchimento testado (50%). Já em relação à camada ativa, o modelo subestima bastante as velocidades dos grãos de café verde em comparação com os dados experimentais.

A análise destes dois comportamentos distintos na previsão do escoamento das regiões ativa e a passiva, sugere que é necessário a adição de um parâmetro que melhor descreva a interação (partícula-partícula) entre os grãos de café na camada onde os mesmos deslocam-se com as maiores velocidades (camada ativa).

Assim, mantendo-se as condições de não deslizamento do material na parede, para caracterizar de maneira mais adequada a troca de momento entre as partículas, decidiu-se incluir no modelo o parâmetro referente à viscosidade friccional. É importante ressaltar que a viscosidade friccional não é uma condição de contorno na parede, trata-se de um parâmetro que quantifica troca de quantidade de movimento entre o material particulado.

A viscosidade friccional descreve apropriadamente regiões onde os contatos entre as partículas são longos e duradouros e ocorre atrito e deslizamento entre as mesmas. Essas características são encontradas fisicamente na região ativa do leito no regime de rolamento e assim justifica-se o emprego deste parâmetro na resolução numérica aqui desenvolvida.

Os resultados desta combinação: condição de contorno de não deslizamento e parâmetro de viscosidade friccional estão apresentados nas Figuras 4.11 e 4.12, para todos os graus de enchimentos testados, na velocidade de 12,5 rpm. Na Figura 4.11, tem-se a análise qualitativa e na Figura 4.12, os dados quantitativos.

Por meio de uma análise visual da Figura 4.11, pode-se notar para todas as condições testadas que o emprego da viscosidade friccional levou a um maior arqueamento da superfície do leito dentro do tambor, diferentemente do que acontece realmente, como se pode ver nas imagens experimentais. A curvatura acentuada do leito de partículas assemelha-se mais ao cascadeamento, regime que sucede o rolamento.

$f$	<b>Plano Frontal</b>	<b>Plano Meio</b>	<b>Experimental</b>	$\alpha_s[-]$
-----	----------------------	-------------------	---------------------	---------------

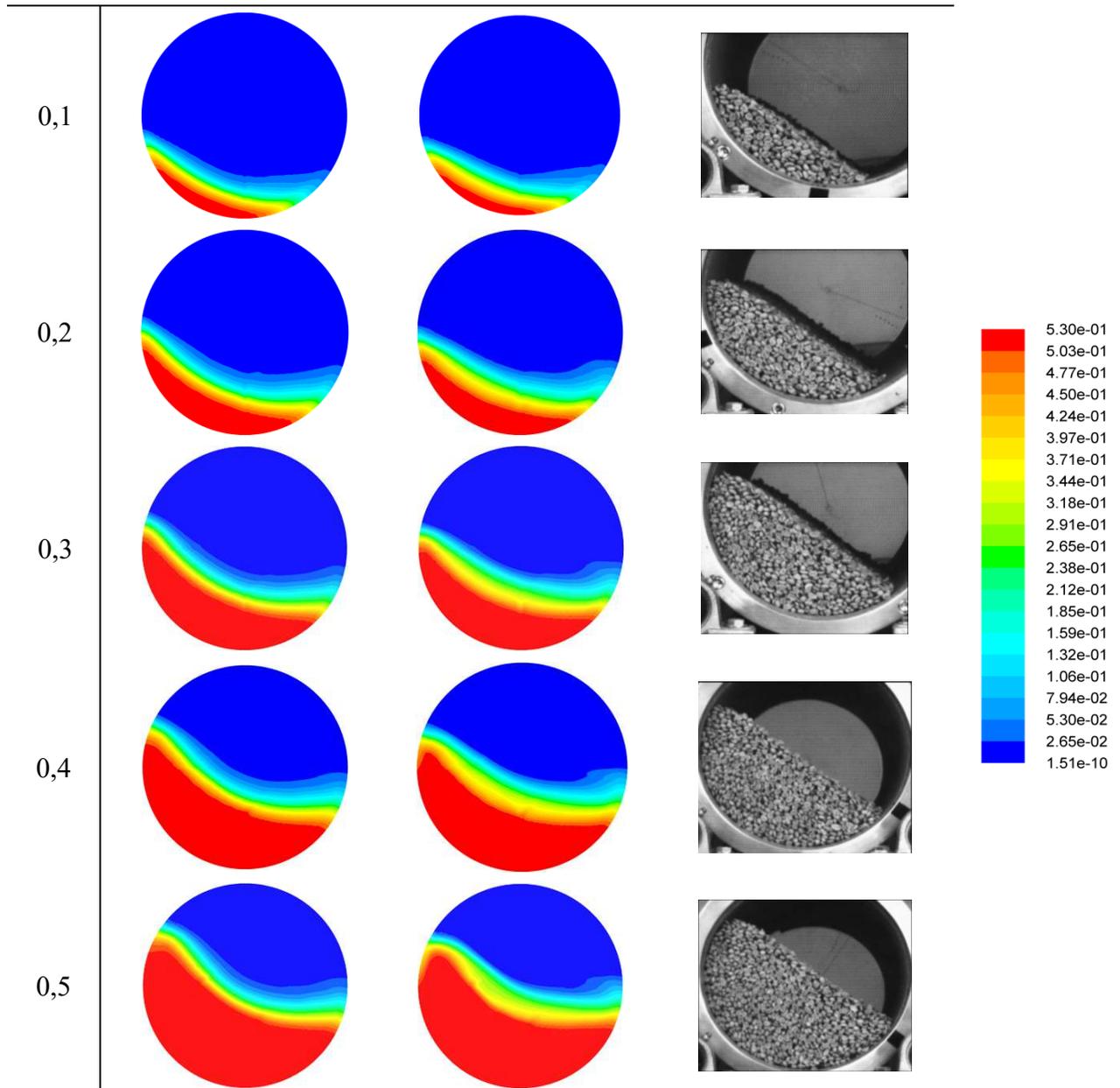


Figura 4.11: Frações volumétricas de sólidos observadas experimental e numericamente para a condição de contorno “no slip” e modelo de viscosidade friccional (12,5 rpm).

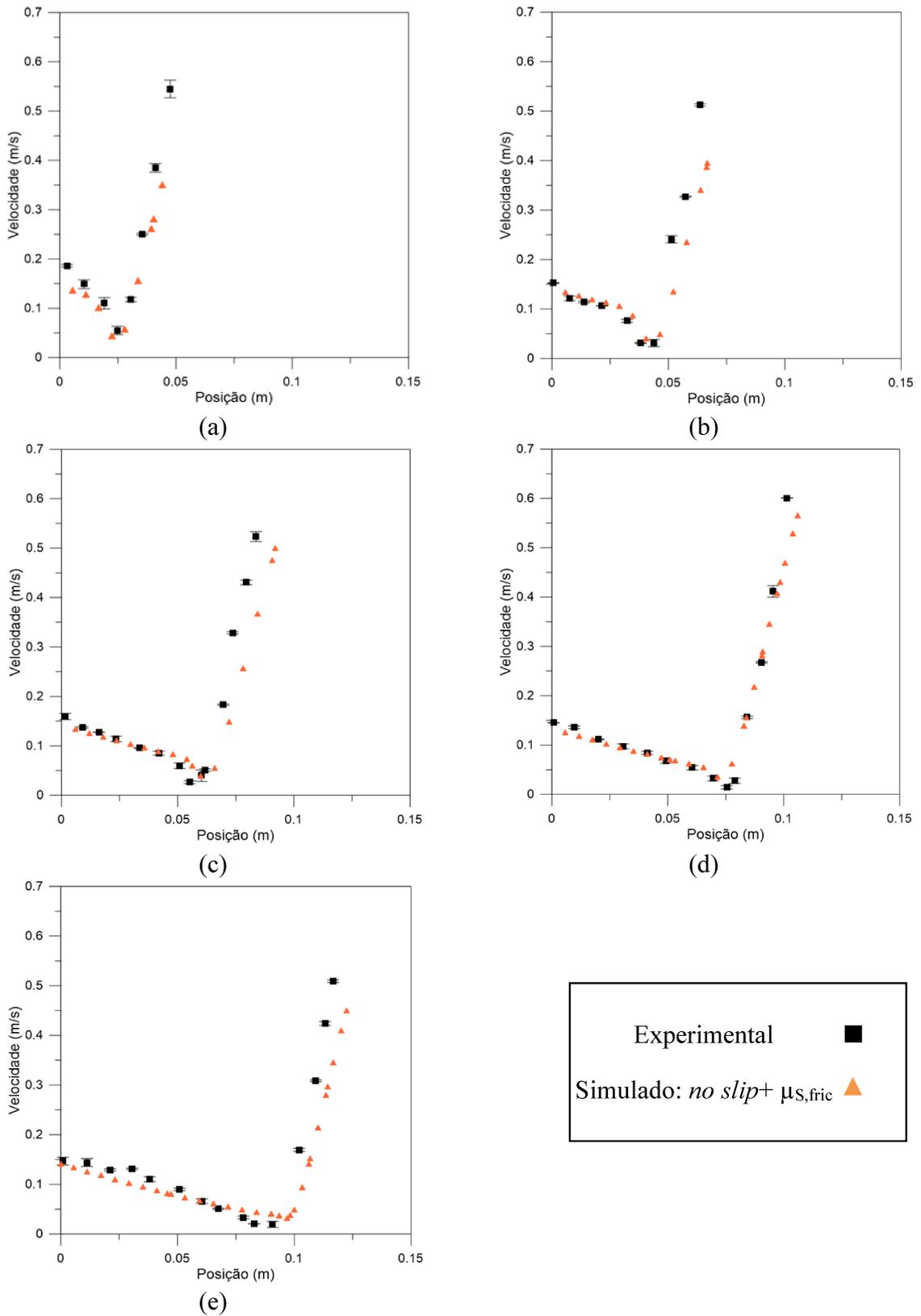


Figura 4.12: Perfil de velocidade das partículas de café verde experimental e simulado para a condição de contorno de não deslizamento (no slip) e modelo de viscosidade friccional testados com graus de enchimento de: (a) 10% ; (b) 20%, (c) 30%, (d) 40% e (e) 50%.

Os perfis de velocidade são apresentados na Figura 4.12. Observa-se que o modelo testado juntamente com a viscosidade friccional levou a bons resultados e tem-se uma grande proximidade entre os resultados simulados e os dados dos experimentos. É possível afirmar que para as velocidades das partículas tanto na camada ativa quanto na camada passiva e também para a posição da região de interface entre as duas camadas o modelo descreveu satisfatoriamente o comportamento dos grãos de café verde.

Delele *et al.* (2016) também empregaram a viscosidade friccional e a condição de não deslizamento na parede em seus estudos numéricos com a metodologia Euleriana multifásica para descrever o comportamento de partículas de trigo dentro um tambor rotatório. Os pesquisadores compararam, da mesma forma que no presente estudo, os perfis de velocidade do material granular dados pela simulação e os valores experimentais. Resultados satisfatórios também foram fornecidos pelo modelo. É interessante destacar que os autores utilizaram trigo como material particulado cuja densidade é  $1370 \text{ kg/m}^3$ , próxima à densidade dos grãos de café verde que vale  $1368,3 \pm 3,9 \text{ kg/m}^3$ .

## **4.2.2 Metodologia Lagrangeana**

### **4.2.2.1 Calibração dos parâmetros pelo método DEM**

Com a intenção de comparar os resultados da simulação empregando a metodologia Lagrangeana, usando o software EDEM®, com os dados experimentais e também com os resultados obtidos pela metodologia Euleriana (com o software Fluent®), decidiu-se realizar uma calibração dos parâmetros necessários para a simulação Lagrangeana, tendo o café verde como partícula de interesse. Nas condições simuladas, o tambor encontrava-se no regime de rolamento (velocidade de rotação de 12,5 rpm para todos os casos) e com enchimento igual a 30%.

É importante ressaltar que foram realizados testes preliminares com o intuito de definir o comprimento do tambor ideal para ser utilizado nas simulações, levando-se em consideração os custos computacionais e a similaridade entre os resultados. Testaram-se as seguintes dimensões: 25% do comprimento (12,5 cm), 50% do comprimento (25 cm) e 100% do

comprimento (50 cm). Considerando-se todos os fatores citados, optou-se por empregar na resolução numérica do problema em estudo o comprimento de 25 cm e o diâmetro correspondente ao real, igual a 21,5 cm.

Conforme apresentado no item 3.2.2, o PCC elaborado para realizar a calibração tem as seguintes variáveis: coeficiente de atrito estático partícula-partícula ( $AE_{pp}$ ), coeficiente de atrito estático partícula-parede ( $AE_{pw}$ ), coeficiente de atrito de rolamento partícula-partícula ( $AR_{pp}$ ), coeficiente de atrito de rolamento partícula-parede ( $AR_{pw}$ ).

Dentre as variáveis citadas, o  $AE_{pp}$  e o  $AE_{pw}$  foram medidos experimentalmente, tanto para partículas individuais quanto para o agrupamento das mesmas, de acordo com a metodologia apresentada no item 3.1.1. Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 4.5, na sequência.

Tabela 4.5: Valores experimentais para o coeficiente de atrito estático para partícula individual e em agrupamentos.

	Valor Experimental – Partícula individual	Valor Experimental – Partícula agrupada	Valor Default – software EDEM
$AE_{pw}$	$0,72 \pm 0,02$	$1,10 \pm 0,03$	0,5
$AE_{pp}$	$0,92 \pm 0,03$	$0,74 \pm 0,04$	0,5

Nota-se pelo conteúdo da Tabela 4.5, que os valores dos parâmetros obtidos pelas medidas com partículas individuais e partículas em aglomerados são bastante distintos. Uma possível explicação para o atrito estático partícula-parede ( $AE_{pw}$ ) ser maior para o agrupamento é a redução do rolamento dos grãos, isto é, quando juntas, as partículas tendem a deslizar e não a rolar, reduzindo a interferência do rolamento na medida deste parâmetro. Já no caso do atrito estático partícula-partícula encontrou-se um valor menor com o agrupamento em comparação com as partículas livres individualmente avaliadas. Isto pode ser devido à disposição irregular dos grãos quando coladas sobre o dispositivo usado para coleta de dados. Os grãos de café verde aderidos à superfície formam uma camada com grandes irregularidades, que pode ter favorecido

o deslizamento dos agrupamentos. Como os grãos citados apresentam formato irregular, não são válidas as mesmas considerações feitas para esferas regulares.

Assim, a Tabela 4.6, contém o planejamento que foi executado para calibrar os parâmetros discutidos anteriormente ( $AE_{pw}$ ,  $AE_{pp}$ ,  $AR_{pw}$  e  $AR_{pp}$ ). Trata-se de um planejamento composto central com duas réplicas no ponto central, com um total de vinte e seis simulações que contém uma combinação dos valores medidos experimentalmente para os atritos estáticos e também o valor *default* deste parâmetro para o software EDEM®.

Tabela 4.6: Matriz do PCC para as simulações Lagrangeanas.

	$AE_{pp}$	$AE_{pw}$	$AR_{pp}$	$AR_{pw}$
<b>1</b>	0,500	0,500	0,010	0,010
<b>2</b>	0,500	0,500	0,010	0,030
<b>3</b>	0,500	0,500	0,030	0,010
<b>4</b>	0,500	0,500	0,030	0,030
<b>5</b>	0,500	0,970	0,010	0,010
<b>6</b>	0,500	0,970	0,010	0,030
<b>7</b>	0,500	0,970	0,030	0,010
<b>8</b>	0,500	0,970	0,030	0,030
<b>9</b>	0,900	0,500	0,010	0,010
<b>10</b>	0,900	0,500	0,010	0,030
<b>11</b>	0,900	0,500	0,030	0,010
<b>12</b>	0,900	0,500	0,030	0,030
<b>13</b>	0,900	0,970	0,010	0,010
<b>14</b>	0,900	0,970	0,010	0,030
<b>15</b>	0,900	0,970	0,030	0,010
<b>16</b>	0,900	0,970	0,030	0,030
<b>17</b>	0,403	0,735	0,020	0,020
<b>18</b>	0,997	0,735	0,020	0,020
<b>19</b>	0,700	0,387	0,020	0,020

20	0,700	1,083	0,020	0,020
21	0,700	0,735	0,005	0,020
22	0,700	0,735	0,035	0,020
23	0,700	0,735	0,020	0,005
24	0,700	0,735	0,020	0,035
25	0,700	0,735	0,020	0,020
26	0,700	0,735	0,020	0,020

Uma das respostas avaliadas foi o ângulo de repouso dinâmico. Nas simulações os ângulos foram avaliados tanto na parede do tambor quanto em um plano localizado no meio do cilindro (comprimento igual a 12,5 cm) para investigar a existência de efeito de parede no estudo numérico. Estes dados estão contidos na Tabela 4.7, juntamente com o erro relativo ao valor experimental do ângulo de repouso dinâmico:  $37,4^\circ \pm 0,5^\circ$ , que foi obtido nas mesmas condições das simulações: fração de enchimento igual a 30% e velocidade de rotação de 12,5 rpm.

Tabela 4.7: Ângulo de repouso dinâmico medido para as simulações do PCC (plano frontal e do meio) e comparação com dado experimental.

Simulação	Ângulo de Repouso Dinâmico Medido		Erro (%)
	Plano Frontal	Plano Meio	
1	38,5	37,3	2,94
2	39,9	37,7	6,68
3	38,5	37,9	2,94
4	39,1	38,7	4,55
5	37,0	36,2	1,07
6	37,4	36,8	0,00
7	39,5	39,0	5,61
8	40,1	39,0	7,22
9	38,0	36,9	1,60
10	37,4	37,0	0,00

11	39,3	38,4	5,08
12	39,0	38,7	4,28
13	37,8	37,2	1,07
14	37,2	37,0	0,53
15	39,8	39,8	6,42
16	39,2	38,0	4,81
17	38,0	37,3	1,60
18	38,9	37,6	4,01
19	38,5	38,3	2,94
20	39,1	39,0	4,55
21	37,6	37,6	0,53
22	39,4	39,4	5,35
23	38,7	38,4	3,48
24	38,8	38,8	3,74
25	40,1	38,5	7,22
26	40,1	38,5	7,22

Observa-se nos resultados da Tabela 4.7 que as simulações que apresentam resultados com valores de desvio em relação ao valor experimental inferiores a 1,5% são as seguintes: 5, 6, 10, 13, 14 e 21. Na imagem da Figura 4.13 tem-se os resultados numéricos destas simulações (plano frontal) assim como uma imagem experimental.

É possível visualizar, por análise da Tabela 4.7, que para praticamente todas as simulações, com exceção dos casos 15, 22 e 24, tem-se a presença do efeito de parede, uma vez que o ângulo de repouso dinâmico avaliado na parede do cilindro tem um valor superior ao encontrado para a posição intermediária na metade do tambor. Esse fato não é observado experimentalmente e é produzido pela combinação dos parâmetros empregados na resolução numérica.

Com apenas a medida do ângulo de repouso dinâmico não foi possível obter uma análise conclusiva para a calibração dos parâmetros para o café verde, visto que os valores de ângulo de repouso encontrados para as simulações foram muito próximos. Por isso realizou-se também

uma análise dos perfis de velocidade para todos os casos simulados, assim como feito experimentalmente e também por meio da metodologia Euleriana.

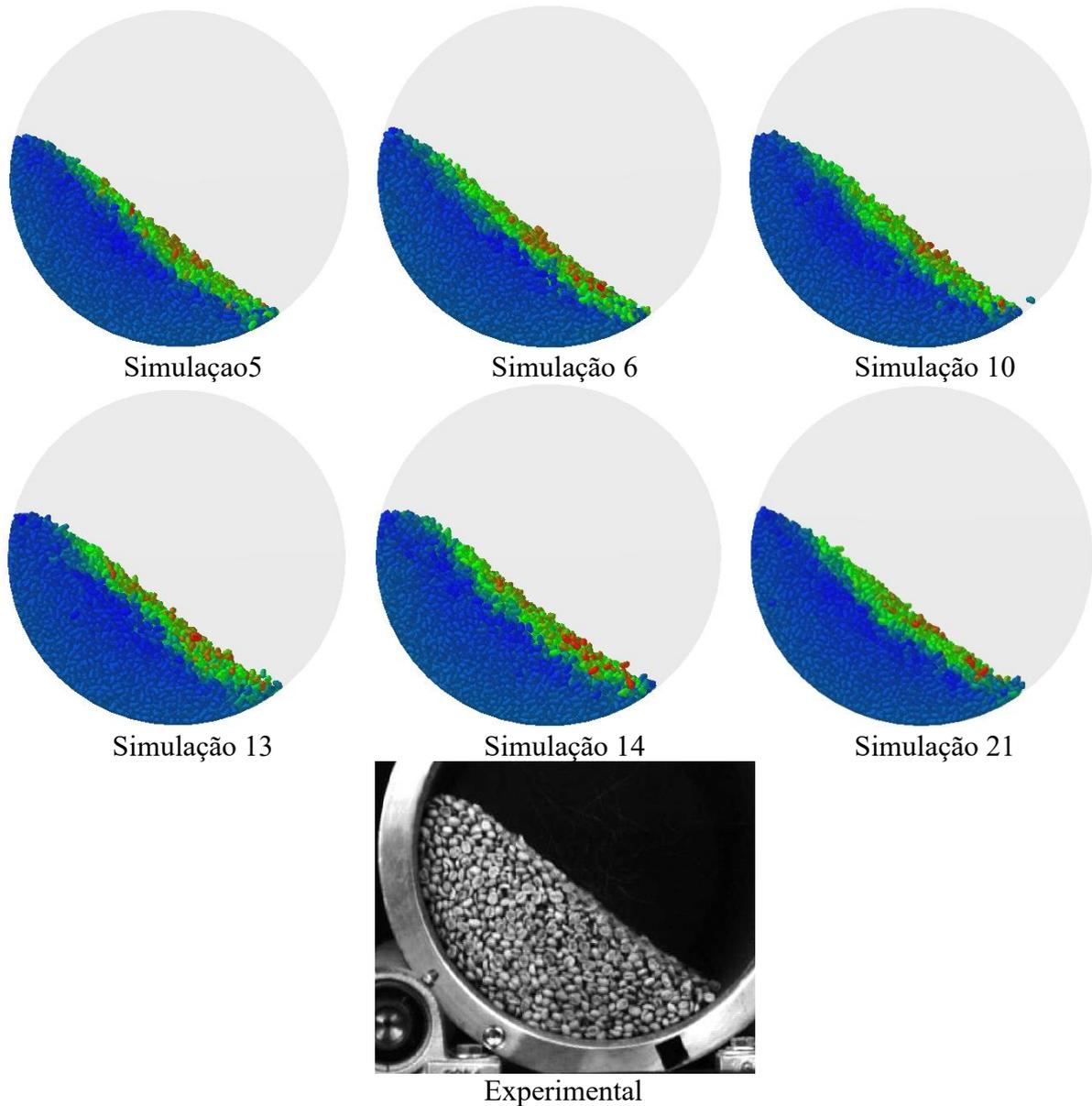


Figura 4.13: Plano frontal do tambor experimental e resultado das simulações 5, 6, 10, 13, 14 e 21.

Os perfis encontrados por meio da metodologia Lagrangeana possuem um comportamento característico, com a presença da camada ativa, da região passiva e de um ponto

de inversão entre ambas. Para todos os casos, os resultados numéricos conseguiram descrever bem a velocidade dos grãos de café dentro da camada passiva, as maiores diferenças foram encontradas na camada ativa, onde as partículas movem-se mais rapidamente.

Na Figura 4.14 encontram-se os gráficos de perfil de velocidade de partículas para as simulações com os melhores resultados de ângulo de repouso dinâmico, sendo elas 5, 6, 10, 13, 14 e 21. Juntamente estão os valores de velocidade obtidos de maneira experimental para a mesma condição, isto é, enchimento igual a 30% e velocidade de rotação do tambor de 12,5 rpm.

De uma maneira geral, fica evidente pelos gráficos uma superestimação da velocidade na camada ativa pelos dados numéricos. Assim, para uma mesma posição, os resultados simulados indicam um valor de velocidade maior do que foi encontrado experimentalmente. Também para os casos 5, 6 e 10, a simulação prevê a inversão da camada passiva para ativa em uma posição anterior, quando comparado com os dados experimentais.

Já para a simulação de número 13, tem-se uma maior concordância entre os resultados simulados e os experimentais, tanto em relação à velocidade dos grãos quanto a interface ativa-passiva. O mesmo comportamento pode ser observado na Figura 4.15, referentes às simulações 18 e 23. Estas três simulações, dentre todas as avaliadas pelo PCC em estudo, apresentaram os melhores resultados para os perfis de velocidade dos sólidos.

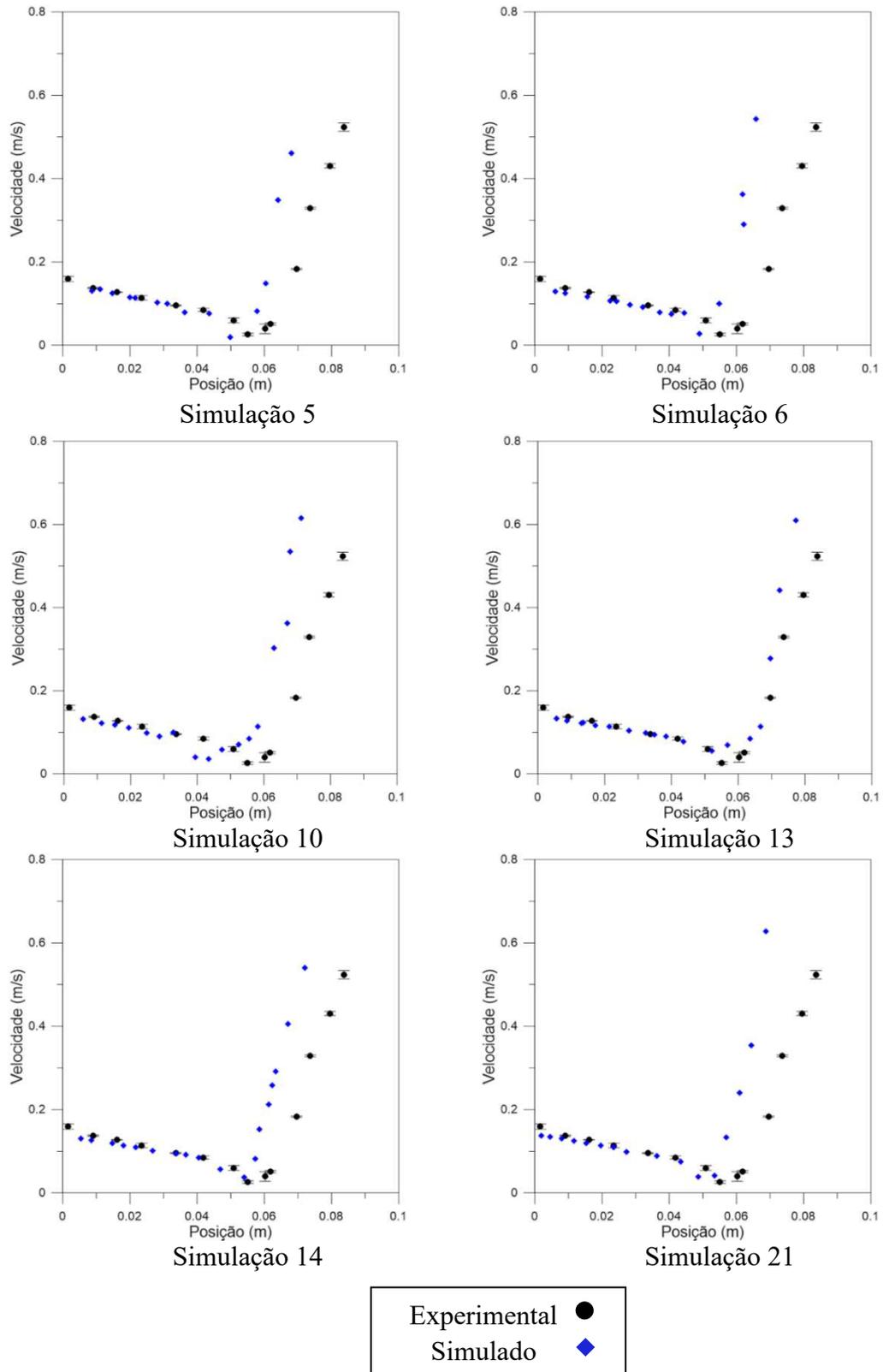


Figura 4.14: Perfis de velocidade das partículas de café verde experimental e das simulações 5, 6, 10, 13, 14 e 21.

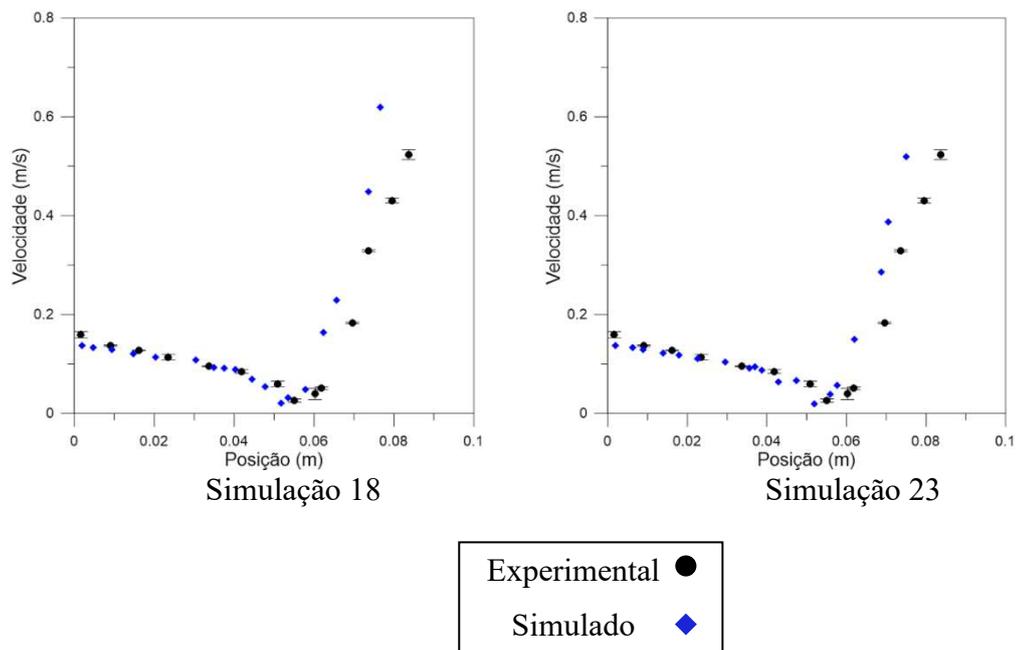


Figura 4.15: Perfis de velocidade das partículas de café verde experimental e das simulações 18 e 23.

Assim, ao considerar-se as duas análises feitas: ângulo de repouso dinâmico e perfil de velocidade de partículas, uma das simulações apresentou bom resultados para ambas as medidas. Trata-se da simulação de número 13, cujos valores dos parâmetros testados são aqui recomendados como os mais adequados dentro da calibração desenvolvida.

Em adição, é interessante destacar que, considerando os coeficientes de atrito de rolamento constantes e analisando os coeficientes de atrito estático – parâmetros medidos experimentalmente por dois métodos distintos, os resultados simulados mais próximos aos experimentais são aqueles obtidos segundo a metodologia na qual se observa a partícula de maneira individual e não em formação de aglomerados. Uma análise deste efeito está explicitada no gráfico a seguir, na Figura 4.16.

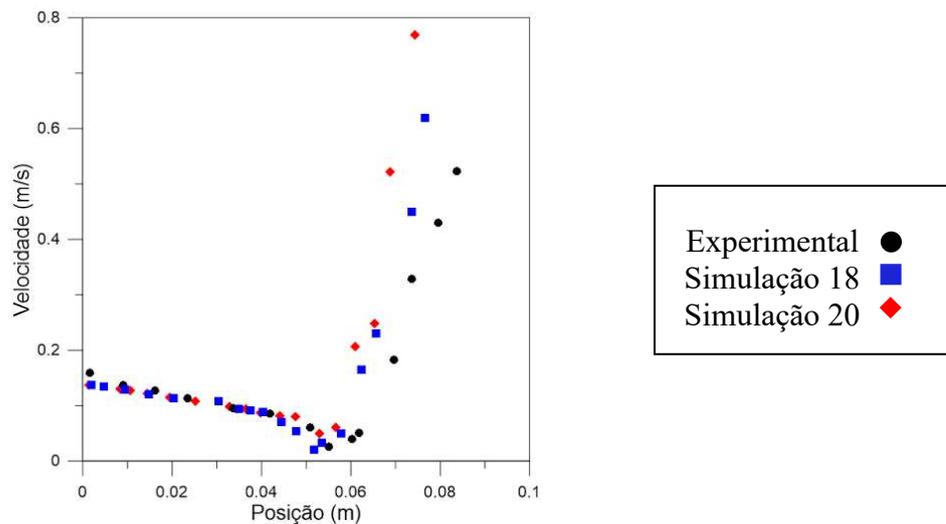


Figura 4.16: Comparação dos perfis de velocidade de partículas experimental, dados da simulação 18 e dados da simulação 20.

De acordo com a Figura 4.16, o comportamento da simulação número 18 do PCC assemelha-se mais aos dados reais do que o da simulação 20. Como apresentado na Tabela 4.6, para ambos os casos,  $AR_{pp}$  e  $AR_{pw}$  possuem o mesmo valor de 0,02. A simulação 18 apresenta os dois coeficientes de atrito estático (partícula-partícula e partícula-parede) próximos aos encontrados pela metodologia que utilizou os grãos livres, sendo  $AE_{pp}$  (simulação 18) = 0,996 e  $AE_{pw}$  (simulação 18) = 0,735 e os dados experimentais  $AE_{pp}$  = 0,92 e  $AE_{pw}$  = 0,72. Já para simulação 20, tem-se  $AE_{pp}$  (simulação 20) = 0,700 e  $AE_{pw}$  (simulação 20) = 1,083, muito próximos dos dados experimentais obtidos pela metodologia que mediu os parâmetros com aglomerados de partículas, sendo  $AE_{pp}$  = 0,74 e  $AE_{pw}$  = 1,10.

Entretanto, as simulações 18 e 20 fornecem um ângulo de repouso dinâmico que quando comparado com o dado experimental, apresentam erros maiores que os dados da simulação 13. Vale destacar que a calibração leva em consideração o efeito combinado dos parâmetros e não apenas as suas contribuições isoladas.

Como já citado, café verde é uma partícula com formato bastante irregular, apresentando, portanto, uma elevada complexidade em avaliar o efeito do agrupamento das

partículas em relação aos parâmetros estudados. A calibração realizada por este trabalho levou em consideração não apenas o ângulo de repouso dinâmico, como feito em diversos trabalhos presentes na literatura, mas avalia também dados quantitativos de perfis de velocidade. Ainda assim, é necessário compreender de maneira mais aprofundada o comportamento *bulk* do material, uma vez que a avaliação experimental destes parâmetros apresenta também algumas limitações.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 Conclusões

Quanto ao estudo experimental da dinâmica do café em um tambor rotatório, as principais conclusões estão expostas na sequência.

A técnica de imagem utilizada foi capaz de identificar os regimes de interesse e as transições entre eles para os dois materiais estudados, sendo elas: rolamento-cascadeamento, cascadeamento-catarateamento, catarateamento-centrifugação. Para as duas primeiras transições citadas não se encontrou diferenças relevantes entre o comportamento dos grãos verdes ou torrados. A transição do regime de cascadeamento para a centrifugação foi a que apresentou maior diferença entre o comportamento das duas partículas, evidenciando a influência das propriedades do material sobre esta transição. O café torrado, cuja densidade é sensivelmente menor que o café verde, apresentou maiores velocidades de transição para menores graus de enchimento, conforme já reportado pela literatura.

O ângulo de repouso dinâmico de ambas as partículas analisadas não se mostrou dependente do grau enchimento e nem da velocidade de rotação do tambor e tem um valor médio de  $38,40^\circ \pm 0,65^\circ$  para o café verde e  $38,94^\circ \pm 0,67^\circ$  para o café torrado.

Realizou-se um estudo mais detalhado do regime de rolamento, indicado por Cristo *et al.* (2006) como o regime de escoamento ideal para operação dos equipamentos de torra de café. Obtiveram-se perfis de velocidade dos grãos verde e torrados para diferentes velocidades de rotação do tambor em cinco graus de enchimento. Também mediu-se a espessura da camada ativa no rolamento para as partículas verdes e torradas nestas mesmas condições de operação e a espessura foi influenciada pela rotação do tambor e pelo seu nível de enchimento também. Para ambas as partículas analisadas, a espessura da camada ativa, quando o grau de enchimento é mantido constante, apresentou grandes semelhanças para as velocidades testadas. Esta informação pode ser levada em consideração para simulações envolvendo o processo de torra e simplificar a modelagem.

Em relação ao estudo numérico do escoamento dos grãos de café verde no tambor rotatório utilizado neste trabalho, empregou-se a abordagem Euleriana e a abordagem Lagrangeana. As conclusões mais relevantes quanto às simulações estão listadas a seguir.

Para a aproximação Euleriana, testaram-se duas condições de contorno na parede: o coeficiente de especularidade e a condição de não deslizamento.

A respeito dos diferentes valores de coeficiente de especularidade avaliados, nenhum deles mostrou-se eficiente em reproduzir o perfil de velocidade do material particulado dentro do tambor operando no regime de rolamento. O menor coeficiente de especularidade, igual a 0,01, representou melhor a superfície do leito, qualitativamente. Fisicamente as partículas estavam em condição de deslizando na parede e não foram carregadas a alturas maiores que o leito, não causando uma deformação da superfície. Mas a avaliação quantitativa dos perfis revelou que para a faixa de coeficientes de especularidade de 0,1 a 1 os resultados apresentam grande semelhança entre si, apesar de distantes dos dados reais.

Já a condição de contorno “*no slip*” juntamente com o modelo de viscosidade friccional representaram bem o fenômeno de escoamento dos grãos de café verde, prevendo de maneira satisfatória a velocidade das partículas nas duas regiões do regime de rolamento, ativa e passiva, e a posição de inversão entre elas. Dessa forma, concluiu-se também que o coeficiente de especularidade igual a 1 não representa a mesma condição de contorno que o não deslizamento, como já constatado na literatura.

Para a aproximação Lagrangeana, realizou-se uma calibração dos parâmetros: coeficiente de atrito estático partícula-partícula ( $AE_{pp}$ ) e partícula-parede ( $AE_{pw}$ ), coeficiente de atrito de rolamento partícula-partícula ( $AR_{pp}$ ) e partícula-parede ( $AR_{pw}$ ) por meio de um Planejamento Composto Central. Devido à escassez de informações dos parâmetros de simulação para o café foi preciso medi-los experimentalmente. A calibração levou em consideração os perfis de velocidade de partícula previstos pelo modelo DEM e também as medidas dos ângulos de repouso dinâmico dados pela simulação. Os valores encontrados por este trabalho, de acordo com a calibração realizada, são os seguintes:  $AE_{pp} = 0,90$ ;  $AE_{pw} = 0,97$ ;  $AR_{pp} = 0,01$  e  $AR_{pw} = 0,01$ .

Ao comparar-se o desempenho das duas metodologias, percebe-se que ambas foram capazes de descrever o comportamento da partícula estudada, dadas as adequadas condições de contorno para a modelagem Euleriana e os parâmetros obtidos com a calibração para a modelagem Lagrangeana.

A metodologia Euleriana apresenta um esforço computacional menor em comparação com a Lagrangeana. Sua implementação envolve modelos matemáticos que descrevem as equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento mais complexos e os parâmetros relativos às partículas são empregados dentro dos cálculos destas equações dos modelos. Apesar de a modelagem da fase sólida não permitir o acompanhamento individual das partículas, sua resolução numérica é eficiente e tem grande aplicabilidade.

A metodologia Lagrangeana permite um acompanhamento individual das partículas simuladas, sendo mais fácil conhecer localmente as propriedades de interesse. Entretanto, esta abordagem se mostra bastante dependente de um grande número de parâmetros cuja medida física é complicada e, muitas vezes, pode não representar o comportamento *bulk* do material sólido.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Como sugestões para trabalhos futuros, apresentam-se:

- ❖ Estudar experimental e numericamente o processo de torra visando compreender a influência da dinâmica dos grãos de café na transferência de calor e massa na torrefação.
- ❖ Avaliar experimentalmente como diferentes condições de rugosidade na parede do tambor podem influenciar as transições entre os regimes de escoamento de partículas.
- ❖ Simular, utilizando-se os parâmetros sugeridos pela calibração desenvolvida por este trabalho, diferentes velocidades de rotação do tambor e avaliar a aplicabilidade para previsão de outros regimes de escoamento, além do rolamento.

- ❖ Simular, com o modelo Euleriano empregado neste estudo, diferentes velocidades de rotação do tambor e estudar a previsão de outros regimes de escoamento, além do rolamento.
- ❖ Avaliar numericamente a influência do coeficiente de restituição dos grãos de café no escoamento destas partículas.
- ❖ Equipar internamente com suspensores o tambor utilizado nos testes experimentais deste trabalho para avaliar a influência dos mesmos na dinâmica dos grãos de café.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- AISSA, A.A., DUCHESNE, C., RODRIGUE, D. Transverse mixing of polymer powders in a rotary cylinder part I: Active layer characterization. Powder Technology, vol. 219, p. 193-201, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.12.040>.
- ALIZADEH, E., BERTRAND, F., CHAOUKI, J. Comparison of DEM Results and Lagrangian Experimental Data for the Flow and Mixing of Granules in a Rotating Drum. AIChE, v. 60, p. 60-75, 2013. <https://doi.org/10.1002/aic.14259>.
- ALMEIDA, C. A. K. Comportamento do hidrociclone filtrante frente às modificações no diâmetro de underflow e no tubo de vortex finder. Dissertação de Mestrado, 89 p., UFU, Uberlândia/MG, 2008.
- BELITZ, H. D., GROSCH, W., & SCHIEBERLE, P., Food chemistry, 4th ed.,. Heidelberg: Springer – cap. 21, 2009.
- BERBERT, P. A., QUEIROZ, D. M., SOUSA, E. F., MOLINA, M. B., MELO, E. C., & FARONI, L. R. D., Dielectric properties of parchment coffee, Journal of Agricultural Engineering Research, v. 80, p. 65–80, 2001. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0689>.
- BISOGNIN, P.C., Transferência de calor em leitos fluidizados: influência dos parâmetros da superfície de troca térmica. 115 p. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis/SC, 2015.
- BLUMBERG, W., SCHLÜNDER, E.-U., Transversale Schüttgutbewegung und konvektiver Stoffübergang in Drehrohren. Teil 1: Ohne Hubschaufeln, Chemical Engineering and Processing, vol. 35, p. 395-404, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(96\)04152-9](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(96)04152-9).
- BOATENG, A., Rotary kiln transport phenomena, Ph.D. Dissertation, University of British Columbia, British Columbia, Canada, 1993.
- 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. <https://doi.org/10.1017/S0022112096003680>.
- BOTTAZZI D., EGGERS, R., PIETSCH, A. Roasting Coffee: Recent Developments. Blackwell Science, p. 90–107, 2001.
- CHOU, S.H., HSIAU, S.S., Dynamic properties of immersed granular matter in different flow regimes in a rotating drum, Powder Technology, v. 226, p. 99-106, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.04.024>.

COETZEE, C. J.; ELS, D. N. J. Calibration of granular material parameters for DEM modelling and numerical verification by blade - granular material interaction. Journal of Terramechanics, v. 46, p. 15-26, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2008.12.004>.

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento, Acompanhamento da safra brasileira de café, dezembro/2015. Disponível em: [http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15\\_12\\_17\\_09\\_02\\_47\\_boletim\\_cafe\\_de\\_zembro\\_2015\\_2.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_12_17_09_02_47_boletim_cafe_de_zembro_2015_2.pdf). Acessado em 20/11/16.

CRISTO, H. P.; MARTINS, M. A.; OLIVEIRA, L. S.; FRANCA, A.S. Transverse flow of coffee beans in rotating roasters, Journal of Food Engineering, v. 75, p 142-148, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.010>.

CUNDALL, P. A.; STRACK, O.D.L. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. Geotechnique, v. 29, p. 47-65, 1979. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>.

DARTEVELLE, S., Numerical and granulometric approaches to geophysical granular flows, Ph.D. thesis, Michigan Technological University, Department of Geological and Mining Engineering, Houghton, Michigan, 2003.

DECKER, R. K., MEIER, H. F., MORI, M. Validação de Modelo Tridimensional para o Escoamento Gás-Sólido Diluído Vertical e Horizontal por Técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD), Boletim Técnico Petrobras, v. 47, p 88-100, 2004.

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. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.01.026>.

DING, Y. L., SEVILLE, J. P. K., FORSTER, R., PARKER, 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. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00468-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00468-1).

DEM Solutions, Ltd. 2005. Disponível em: < <http://www.dem-solutions.com>>. Acesso em: 22/09/2016.

DEMAGH, Y., MOUSSA, H.B., LACHI, M., NOUI, S., BORDJA, L., Surface particle motions in rotating cylinders: Validation and similarity for an industrial scale kiln, Powder Technology, v. 224, p. 260-272, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.03.002>.

DONATELLI, A., GARZONE, P., IOVANE, P. Discharging granular material from a Rotary kiln in a slumping regime: Theoretical and experimental studies. Particuology, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2015.02.003>.

DUARTE, C.R. Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica e recobrimento em leito de jorro. 194p. Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia/MG, 2006.

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.

EMBRAPA, Brasil consome mais de 13% do café produzido no mundo em 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/web/portal/busca-de-noticias/-/noticia/14452182/brasil-consome-mais-de-13-do-cafe-produzido-no-mundo-em-2015>, Acessado em 14/07/16.

ESQUIVEL, P., JIMÉNEZ, V. M., Functional properties of coffee and coffee by-products, Food Research International, v. 46, p.488–495, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.05.028>.

FABRRI, A., CEVOLI, C., ALESSANDRINI, L., ROMANI, S., Numerical modeling of heat and mass transfer during coffee roasting process, Journal of Food Engineering, v. 105, p. 264-269, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.02.030>.

FOERSTER, S., LOUGE, M., CHANG, H., ALLIA, K. Measurements of the collision properties of small spheres, Physics of Fluids, v. 6, p. 1108–1115, 1994. <https://doi.org/10.1063/1.868282>.

FLUENT INC., Fluent 14.0 User's Guide, Centerra Resource Park 10, Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, 2006.

GIBILARO, L.G., DI FELICE, R., WALDRAM, S.P., Generalized friction factor and drag coefficient correlations for fluid-particle interactions, Chemical Engineering Science, vol. 40, p. 1817-1823, 1985. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(85\)80116-0](https://doi.org/10.1016/0009-2509(85)80116-0).

GIDASPOW, D., BEZBURUAH, R., DING, J., Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach in fluidization, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization, p. 75, 1992.

GIDASPOW, D., Multiphase Flow and Fluidization, Academic Press, Boston, 1994.

Global Exchange, Coffee in the Global Economy. Disponível em <http://www.globalexchange.org/fairtrade/coffee/faq>, Acessado em 12/05/15.

HÄRTL, J., OOI, J.I. Experiments and simulations of direct shear tests: porosity, contact friction and bulk friction. Granular Matter, v. 10, p. 263-271, 2008. <https://doi.org/10.1007/s10035-008-0085-3>.

HE, Y.R., CHEN, H.S., DING, Y.L., LICKISS, B., Solids motion and segregation of binary mixtures in a rotating drum mixer, Chemical Engineering Research and Design, vol. 85, p. 963-973, 2007. <https://doi.org/10.1205/cherd06216>.

HEMA, V. Mathematical modelling of the dynamics of granular materials in a rotating cylinder. Doctor Thesis, The Cochin University of Science and Technology, India, 2003

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. <https://doi.org/10.1007/BF02661016>.

HUI, K., UNGAR, J., HAFF, P., JACKSON, R. Boundary conditions for high-shear grain flows, J. Fluid Mech., vol.145, p. 223-233, 1984. <https://doi.org/10.1017/S0022112084002883>.

HUILIN, L., GIDASPOW, D., BOUILLARD, J., WENTIE, L., Hydrodynamic simulation of gas-solid flow in a riser using kinetic theory of granular flow, Chemical Engineering Journal, vol. 95, p. 1-13, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(03\)00062-7](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(03)00062-7).

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION - ICO. Trade Statistics Tables. Disponível em: [http://www.ico.org/trade\\_statistics.asp?section=Statistics](http://www.ico.org/trade_statistics.asp?section=Statistics), Acessado em 07/02/2017.

JING, L; STEPHANSSON, O. Fundamentals of Discret Element Methods for Rock Engineering: theory and Applications. 1. ed. Stockholm, Elsevier, 2007. [https://doi.org/10.1016/S0165-1250\(07\)85001-2](https://doi.org/10.1016/S0165-1250(07)85001-2).

JOHNSON, P.C., e JACKSON, R., Frictional-Colisional Constitutive Relations for Granular Materials with Application to Plane Shearing, J. Fluid Mech., v. 176, p. 67-93, 1987. <https://doi.org/10.1017/S0022112087000570>

JUAREZ, G., CHEN, P., LUEPTOW, R. M., Transition to centrifuging granular flow in rotating tumblers: a modified Froude number, New Journal of Physics, v. 13, p. 1-12, 2011. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/13/5/053055>.

JUST, S., TOSCHKOFF, G., FUNKE, A., DJURIC, D., SCHARRER, G., KHINAST, J., KNOP, K., KLEINEBUDDE, P., Experimental Analysis of Tablet Properties for Discrete Element Modeling of an Active Coating Process, AAPS PharmSciTech, v. 14, p. 402-411, 2013. <https://doi.org/10.1208/s12249-013-9925-5>.

KWAPINSKA, M., SAAGE, G., TSOTSAS, E., Mixing of particles in rotary drums: A comparison of discrete element simulations with experimental results and penetration models for thermal processes, Powder Technology, v. 161, p. 69-78, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.08.038>

LACERDA, A. F. Estudo do efeito das variáveis geométricas no desempenho de ciclones convencionais e filtrantes. 138 p. Dissertação de Doutorado, UFU, Uberlândia/MG, 2007.

LI, T.; BENYAHIA, S. Revisiting Johnson and Jackson Boundary Conditions for Granular Flows. American Insitute of Chemical Engineers (AIChE), v. 58, n.7, p. 2058–2068, 2011. <https://doi.org/10.1002/aic.12728>.

LIU, P.Y., YANG, R.Y., YU, A.B., DEM study of the transverse mixing of wet particles in rotating drums, Chemical Engineering Science, v. 86, p. 99-107, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.06.015>.

LOUREL, I., WU, W., MORRISON, D. J. Experimental validation on the computational modelling of granular flow using the discrete element method (DEM). In: Asia-Pacific Bulk Materials Handling Conference, Australia. Conference, Australia, p. 25-27, 2006.

LUN, C.K.K.; SAVAGE, S.B.; JEFFREY, D.J.; CHEPURNIY N.; Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in coquette flow and singly inelastic particles in a general flow field, *J. Fluid Mech.* v.140, p. 223–256, 1984. <https://doi.org/10.1017/S0022112084000586>.

MACHADO, M.V.C. Estudo experimental e numérico da dinâmica de corpos moedores em moinhos de bola. 99 p. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia/MG, 2016.

MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento), Café no Brasil. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cafe/saiba-mais>, Acessado em 12/05/15.

MATIELLO, J.B., O Café do Cultivo ao Consumo. São Paulo: Ed. Globo, 320 p., 1991.

MELLMANN, J., The transverse motion of solids in rotating cylinders—forms of motion and transition behavior, *Powder Technology*, v. 118, p. 251-270, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(00\)00402-2](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(00)00402-2).

MERENDINO, E. M. Estudo do processo de reciclagem do composto de polietileno e alumínio proveniente de embalagens cartonadas assépticas através de simulação computacional usando o método dos elementos discretos (DEM). 106 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2011.

MINDLIN, R.D., DERESIEWICZ, H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces. *J. Appl. Mech.* v. 20, p. 327-344, 1953.

MUGURUMA, Y., TANAKA, T., TSUJI, Y. Numerical simulation of particulate flow with liquid bridge bet (particles simulation of centrifugal tumbling granulator). *Powder Technology*, v. 109, p. 49-57, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00226-0](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00226-0).

NAFSUN, A.I, HERZ, F., Experiments on the temperature distribution in the solid bed of rotary drums. *Applied Thermal Engineering*, v. 103, p. 1039-1047, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.128>.

NASCIMENTO, S.M. Estudo experimental e de simulação da dinâmica de material particulado em tambor rotatório com suspensores. 107p. Dissertação de mestrado, UFU, Uberlândia/MG, 2014.

NOROUZI, H.R., ZARGHAMI, R., MOSTOUFI, N. Insights into the granular flow in rotating drums. *Chem. Eng. Research and Design*, v. 102, p. 12-25, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.06.010>.

OLIVEIRA, R. C., OLIVEIRA, L. S., FRANCA, A. S., AUGUSTI, R. Evaluation of the potential of SPME-GC-MS and chemometrics to detect adulteration of ground roasted coffee with roasted barley. *J. Food Compost*, v. 22, p. 257-261, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2008.10.015>.

ORTOLÁ, M. D., LONDOÑO, L., GUTIÉRREZ, C. L., CHIRALT, A. Influence of roasting temperature on physicochemical properties of different coffees. Food Science and Technology International, v. 4, p. 59-66, 1998. <https://doi.org/10.1177/108201329800400108>.

PALÁCIOS-CABRERA, H.; TANIWAKI, M. H.; MENEZES, H. C.; IAMANAKA, B. T. The production of ochratoxin A by *Aspergillus ochraceus* in raw coffee at different equilibrium relative humidity and under alternating temperatures. Food Control, v. 15, p. 531-535, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2003.08.006>.

PARKER, D. J., DIJKSTRA, A. E., MARTIN, T. W., SEVILLE, J. P. K. Positron emission particle tracking studies of spherical particle motion in rotating drums. Chemical Engineering Science, v. 52, p. 2011–2022, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(97\)00030-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(97)00030-4).

PATANKAR, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

PENG, B. Discrete element method (DEM) contact models applied to pavement simulation. Master thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, Estados Unidos, 2014.

PURSEGLOVE, J. W., Tropical crops dicotyledons, London: The English Language Book Society and Longman Group Ltd, Purseglove (Ed.), p. 451–492, 1974.

QI, H., XU, J., ZHOU, G., CHEN, F., GE, W., LI, J. Numerical investigation of granular flow similarity in rotating drums. Particuology, v. 22, p. 119-127, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2014.10.012>.

RENZO, A., MAIO, F.P. An improved integral non-linear model for the contact of particles in distinct element simulations. Chemical Engineering Science, v. 60, p. 1303-1312, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.10.004>.

RISTOW, G.H., Flow properties of granular materials in three-dimensional geometries. Habilitationsschrift, Philipps-Universität Marburg, p. 63-92, 1998.

ROCK, A. D. WILKINSON, D. Numerical Modelling. In: Velocity variations in Cross-Hole Sonic Logging Surveys: causes and impact in Drilled Shafts. Federal Highway Administration, Disponível em: [http://www.cflhd.gov/programs/techDevelopment/geotech/velocity/documents/05\\_chapter\\_3\\_numerical\\_modeling.pdf](http://www.cflhd.gov/programs/techDevelopment/geotech/velocity/documents/05_chapter_3_numerical_modeling.pdf), Acessado em: 20/08/2015.

RODRIGUES, M. A. A., BORGES, M. L. A., FRANCA, A. S., OLIVEIRA, L. S., CORREA, P. C. Evaluation of physical properties of coffee during roasting. Agricultural Engineering International: The CIGR Journal of Scientific Research and Development, v. 5, p. 1–12, 2003.

ROSE, H.E., SULLIVAN, R.M.E., A treatise on the internal mechanics of ball, tube and rod mills, Constable, London, p. 35-68, 1957.

- SANTOMASO, A.C., DING, Y.L., LICKISS, J.R., YORK, D.W., Investigation of the granular behaviour in a rotating drum operated over a wide range of rotational speed. Institution of Chemical Engineers, v. 81, p. 936-945, 2003. <https://doi.org/10.1205/026387603322482176>.
- SANTOMASO, A., OLIVI, M., CANU, P., Mixing kinetics of granular materials in drums operated in rolling and cataracting regime. Powder Technology, v. 152, p. 41-51, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.01.011>.
- 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, v. 94, p. 204-212, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.07.028>.
- SANTOS, D.A. Contribuições ao estudo da fluidodinâmica em leito de jorro- Estudos experimentais e de simulação via CFD. 106p. Dissertação de mestrado. UFU, Uberlândia/MG, 2011.
- SANTOS, D.A. Estudo experimental e numérico da dinâmica de partículas em um tambor rotatório. 147p. Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia/MG, 2015.
- SANTOS, D.A., PETRI, I.J., DUARTE, C.R., BARROZO, M.A.S., Experimental and CFD study of the hydrodynamic behavior in a rotating drum, Powder Technology, v. 250, p. 52-62, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.10.003>.
- SANTOS, K. G. Estudo da fluidodinâmica do leito de jorro por CFD com malhas tridimensionais. 110 p. Dissertação de mestrado, UFU, Uberlândia/MG, 2008.
- SAVAGE, S. B., JEFFREY, D. J., The stress tensor in a granular flow at high shear rates, J. Fluid Mech., v. 110, p. 255 – 272, 1981. <https://doi.org/10.1017/S0022112081000736>.
- SCHAEFFER, G., Instability in the evolution equations describing incompressible granular flow, J. Differential Equations, v. 66, p. 19-50, 1987.
- SILVA, J. S. Secagem e armazenamento de produtos agrícolas. Dissertação de Mestrado, UFV, Viçosa/MG, 2000.
- SILVÉRIO, B. C. Estudos fluidodinâmicos e de secagem de fertilizantes em diferentes tipos de secadores roto-aerados, 164 p., Dissertação de Doutorado, UFU, Minas Gerais, 2012.
- SUNKARA, K. R., HERZ, F., SPECHT, E., MELLMANN, J. Transverse flow at the flight surface in flighted rotary drum, Powder Technology, v. 275, p. 161-171, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.01.058>.
- SUZZI, D., TOSCHKOFF, G., RADL, S., MACHOLD, D., FRASER, S. D., GLASSER, B. J., KHINAST, J. G., DEM simulation of continuous tablet coating: Effects of tablet shape and fill level on inter-tablet coating variability, Chemical Engineering Science, v. 69, p. 107-121, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.10.009>.

SYAMLAL, M., O'BRIEN, T.J., Simulation of granular layer inversion in liquid fluidized beds, International Journal of Multiphase Flow, v. 14, p. 473-481, 1988. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(88\)90023-7](https://doi.org/10.1016/0301-9322(88)90023-7).

SYAMLAL, M., ROGERS, W. O'BRIEN, T.J. MFIX documentation: Theory Guide, National Technical Information Service, vol. 1, U.S. Department of Energy, Springfield, USA, 1993. <https://doi.org/10.2172/10145548>.

TOLEDO, P. R. A. B., PEZZA, L., PEZZA, H. R., TOCI, A.T. Relationship between the different aspects related to coffee quality and their volatile compounds. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, v.15, p. 705-719, 2016. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12205>.

THOMAZIELLO, R. A. Cultura do Café. 2. ed. Boletim Técnico, CATI/ Campinas, n. 193, 2013.

UN COMTRADE DATABASE - United Nations Statistics Division. Disponível em: <https://comtrade.un.org/data/>, Acessado em: 07/02/2017.

VAZ, M. O., Geração de Malhas de Elementos Finitos Triangulares em Domínios Planos Usando o Método do Avanço da Fronteira. 153 p. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba/PR, 2003.

VIEIRA, L.G.M. Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes, 297 p., Dissertação de Doutorado, UFU, Minas Gerais, 2006.

WALTON, O.R., BRAUN R.L., Simulation of rotary-drum and repose tests for frictional spheres and rigid sphere clusters, Proc. Joint DOE/NFS Workshop on Flow of Particulates and Fluids, p. 1-18, 1993.

WATANABE, H., Critical rotation speed for ball-milling, Powder Technology, v. 104, p. 95-99, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00031-5).

XU, Y., XU, C., ZHOU, Z., DU, J., HU, D., 2D DEM simulation of particle mixing in rotating drum: A parametric study, Particuology, v. 8, p. 141-149, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2009.10.003>.

YAMANE, K., NAKAGAWA, M., ALTOBELLI, S.A., TANAKA, T., TSUJI, Steady particulate flows in a horizontal rotating cylinder, Physics of Fluids, v. 10, p. 1419- 1427, 1998. <https://doi.org/10.1063/1.869858>.

YANG, R. Y., ZOU, R. P., YU, A. B. Microdynamic analysis of particle flow in a horizontal rotating drum. Powder Technology, v. 130, p. 138 – 146, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(02\)00257-7](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00257-7).

ZHONG, H., LAN, X., GAO, J., ZHENG, Y., ZHANG, Z. The difference between specularly coefficient of 1 and no-slip solid phase wall boundary conditions in CFD simulation of gas-

solid fluidized beds, Powder Technology, v. 286, p. 740-743, 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.08.055>.