



**ÁLVARO JOSÉ LIMA RESENDE**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FORMA DA REPRESENTAÇÃO DA  
PARTÍCULA DE CAFÉ PARA A SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO EM  
TAMBOR ROTATIVO**

**LAVRAS – MG  
2023**

**ÁLVARO JOSÉ LIMA RESENDE**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FORMA DA REPRESENTAÇÃO DA PARTÍCULA  
DE CAFÉ PARA A SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO EM TAMBOR ROTATIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal de Lavras, como parte das  
exigências do Curso de Engenharia Química, para a  
obtenção do título de Bacharel.

Prof<sup>a</sup> Orientadora  
Suellen Mendonça Nascimento

**LAVRAS – MG  
2023**

**ÁLVARO JOSÉ LIMA RESENDE**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FORMA DA REPRESENTAÇÃO DA PARTÍCULA  
DE CAFÉ PARA A SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO EM TAMBOR ROTATIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à  
Universidade Federal de Lavras, como parte das  
exigências do Curso de Engenharia Química, para a  
obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 19 de julho de 2023.

Prof. Dr. Irineu Petri Junior

Prof<sup>a</sup>. Dra. Lidja Dahiane Menezes Santos Borel

Prof<sup>a</sup>. Orientadora  
Prof<sup>a</sup>. Dra. Suellen Mendonça Nascimento

**LAVRAS – MG  
2023**

## AGRADECIMENTOS

Tão difícil quanto a realização deste trabalho, é a parte de agradecer. Pois aqui não se trata de um agradecimento qualquer, e esse trabalho representa muito mais do que parece, ele é o fim de uma era, o fechamento de um ciclo muito importante. Sendo assim, começo agradecendo uma das pessoas mais importantes da minha vida, minha Madrinha, que apesar de tanto morde e assopra, sempre me apoiou em (quase) tudo que eu quis fazer, sempre torcendo, sofrendo e vivendo todos os dramas da graduação mais difícil que todos passamos, que é crescer. Além dela, sou muito grato pela família que tenho e pelos momentos que compartilhamos, mas deixo aqui uma lembrança ao meu pai e meu irmão e a todos os meus tios e primos queridos, em especial as minhas primas Isadora, Olívia e Ana Paula que são pessoas incríveis, amo vocês. Deixo também um agradecimento mais que especial à minha mãe, meu avô Deca e avó Maria, por serem pessoas inspiradoras e me motivarem a seguir em frente, mesmo não estando mais presentes aqui, amo vocês e levo todos comigo.

Tão importante quanto a família de sangue, acredito que a família a qual escolhemos também deve ser lembrada, aquela que eu chamo de amigos. Além de compartilhar todos os momentos da minha vida com vocês, vocês são minha grande fortaleza, pois me inspiram a ser uma pessoa melhor a cada dia, e sem vocês eu jamais teria conseguido terminar essa graduação (e esse trabalho), então Thaís, Luiza, Vitor, Clarissa, Júlia, Nathan, Jéssica, Túlio, Ana Clara, Luciana, Lucas, Thalita, Valesca, Ester, Laura, Maria Eduarda, Júlia Ribeiro, Ruth, Isabel amo vocês imensamente, obrigado por tudo. Outra parte dos meus amigos mora bem longe, onde fiz estágio, mas são pessoas igualmente importantes, e gostaria de deixar aqui meu agradecimento para vocês Tarcísio, Matheus, Richardson e Thamara, por terem me acolhido tão longe de casa.

Na graduação, tive a satisfação de participar de muitas entidades que construíram muito da pessoa que sou hoje, então deixo aqui meus agradecimentos ao Centro Acadêmico de ABI, Máfia X, ProcEQ Jr. e NePetro por todos os ensinamentos e grandes amizades proporcionadas. Agradeço também à Universidade Federal de Lavras, pela jornada marcante que vivi em que pude aprender, amadurecer e ver o mundo de formas diferentes. Agradeço também ao corpo docente da Engenharia Química, por todo o conhecimento compartilhado nessa trajetória.

Por fim, mas não menos importante, agradeço imensamente a minha orientadora Suellen, por toda a motivação, inspiração e paciência. Obrigado por me ensinar um pouco do mundo da simulação e fazer com que a nossa pesquisa fosse levada com tanta leveza, você foi perfeita do começo ao fim, e obrigado também por confiar no nosso trabalho.

*“Long short story, I survived” – Taylor Swift*

## RESUMO

A cadeia produtiva do grão de café passa por etapas de colheita no campo, secagem e torra nas indústrias até a distribuição pelas transportadoras. Uma das etapas mais críticas do processamento é a secagem, que envolve a alteração de parâmetros físicos do grão. Um grande aliado ao estudo do escoamento de partículas em equipamentos de secagem é o Método dos Elementos Discretos (DEM), que se utiliza de simulações computacionais para prever o comportamento individual das partículas. No caso da secagem do café, o DEM pode prever os graus de mistura e tempo de residência das partículas nos suspensores, além disso, ao realizar a simulação de partículas não esféricas, deve-se utilizar os *clumps*, que são aglomerados de partículas esféricas que não se separam. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da construção de diferentes partículas de café, formadas por uma, duas e três esferas, na simulação do escoamento dos grãos através da abordagem DEM. Para isso, foram realizadas calibrações, para cada partícula, com o intuito de encontrar a melhor combinação entre os seguintes parâmetros: 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 ( $AR_{pw}$ ). Além disso, o tambor rotativo utilizado como base para a criação da malha computacional possui diâmetro de 21,5 cm e comprimento de 12,5 cm. Todas as simulações foram executadas com um fator de enchimento de 10% do tambor com as partículas, sendo que as calibrações foram executadas inicialmente para o regime de rolamento definido por uma velocidade de rotação de 12,5 rpm. Por fim ficou evidente que as partículas representadas pelo *clump* de três esferas, apesar de ter um custo computacional maior que as outras, foi a mais adequada para simular o comportamento da partícula de café em tambor rotativo em comparação com os dados experimentais da literatura. A melhor calibração foi definida como sendo a combinação dos parâmetros com os valores de 0,403 para  $AE_{pp}$ , 0,735 para  $AE_{pw}$ , 0,020 para  $AR_{pp}$  e 0,020 para  $AR_{pw}$ . No regime de rolamento essa simulação resultou em um valor de  $37,55^\circ$  para o ângulo de repouso, com um desvio de -0,4% do dado experimental, além de representar bem as transições entre os regimes de escoamento relatadas pelas velocidades de rotação da literatura. Quando o café foi representado por partículas de uma e duas esferas, os resultados foram relevantes, contudo, adequadas apenas para o regime de rolamento.

**Palavras-chave:** Secagem; tambor rotatório; Calibração de parâmetros; DEM; Ângulo de repouso; *Clumps*; Regimes de escoamento.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do fruto do café.....	4
Figura 2 – Representação de um tambor rotativo.....	7
Figura 3 – Regimes de escoamento em tambor rotativo. ....	8
Figura 4 – Regiões passiva e ativa do regime de rolamento. ....	11
Figura 5 – Definições do regime de centrifugação.....	13
Figura 6 – Algoritmo da abordagem DEM.....	15
Figura 7 – Propagação da onda de Rayleigh. ....	17
Figura 8 – Diagrama de forças de uma esfera em movimento. ....	19
Figura 9 – Grão de café e sua representação em forma de <i>clump</i> . ....	20
Figura 10 – Representações do café em forma de <i>clump</i> . ....	22
Figura 11 – Malha computacional criada no <i>software Gmsh</i> . ....	23
Figura 12 – Medida do ângulo de repouso dinâmico utilizando-se o <i>software Meazure™</i> . ....	26
Figura 13 – Curvas de transição entre os regimes de escoamento. ....	26
Figura 14 – Simulações 6 (a), 15 (b) e 24 (c) do PCC de calibração dos parâmetros para a partícula de uma esfera.....	30
Figura 15 – Simulações 6 (a), 15 (b) e 24 (c) da partícula de uma esfera na velocidade experimental de transição dos regimes rolamento-cascadeamento.....	32
Figura 16 – Simulações 6 (a), 15 (b) e 24 (c) da partícula de uma esfera na velocidade experimental de transição dos regimes cascadeamento-catarateamento.....	32
Figura 17 – Simulações 6 (a), 15 (b) e 24 (c) da partícula de uma esfera na velocidade experimental de transição dos regimes catarateamento-centrifugação.....	32
Figura 18 – Simulações 7 (a), 22 (b), 24 (c) e 25 (d) do PCC de calibração para a partícula de duas esferas.....	35
Figura 19 – Simulações 7 (a), 22 (b), 24 (c) e 25 (d) da partícula de duas esferas na velocidade experimental de transição dos regimes rolamento-cascadeamento.....	37
Figura 20 – Simulações 7 (a), 22 (b), 24 (c) e 25 (d) da partícula de duas esferas na velocidade experimental de transição dos regimes cascadeamento-catarateamento.....	37
Figura 21 – Simulações 7 (a), 22 (b), 24 (c) e 25 (d) da partícula de duas esferas na velocidade experimental de transição dos regimes catarateamento-centrifugação.....	38
Figura 22 – Simulações 6 (a), 9 (b) e 17 (c) do PCC de calibração dos parâmetros para a partícula de três esfera.....	41
Figura 23 – Simulações 6 (a), 9 (b) e 17 (c) da partícula de três esferas na velocidade experimental de transição dos regimes rolamento-cascadeamento.....	43
Figura 24 – Simulações 6 (a), 9 (b) e 17 (c) da partícula de três esferas na velocidade experimental de transição dos regimes cascadeamento-catarateamento.....	43
Figura 25 – Simulações 6 (a), 9 (b) e 17 (c) da partícula de três esferas na velocidade experimental de transição dos regimes catarateamento-centrifugação.....	44
Figura 26 – Gráfico de custo computacional para simulação.....	45
Figura A.27 – Link para o vídeo que ilustra o movimento das partículas usando os parâmetros de calibração para a partícula de café representada por uma esfera.....	51

Figura A.28 – Link para o vídeo que ilustra o movimento das partículas usando os parâmetros de calibração para a partícula de café representada por duas esferas.....	51
Figura A.29 – Link para o vídeo que ilustra o movimento das partículas usando os parâmetros de calibração para a partícula de café representada por três esferas .....	52
Figura A.30 – Link para o vídeo que ilustra as transições entre os regimes de escoamento para a partícula de café representada por três esferas.....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos regimes de escoamento .....	9
Tabela 2 – Valores de parâmetros DEM presentes em diferentes trabalhos na literatura .....	19
Tabela 3 – Propriedades físicas do grão de café descascado.....	21
Tabela 4 – Parâmetros empregados na simulação Lagrangeana. ....	23
Tabela 5 – Variação dos parâmetros nos planejamentos.....	24
Tabela 6 – Número total de partículas no tambor. ....	25
Tabela 7 – Velocidade angular e período de transição entre os regimes.....	27
Tabela 8 – Ângulo de repouso medido e sua comparação para partícula de uma esfera. ....	28
Tabela 9 – Melhores calibrações pelo ângulo de repouso para partícula de uma esfera. ....	29
Tabela 10 – Resultado da transição entre regimes para partícula de uma esfera. ....	31
Tabela 11 – Ângulo de repouso medido e sua comparação para partícula de duas esferas. ....	33
Tabela 12 – Melhores calibrações pelo ângulo de repouso para partícula de duas esferas. ....	34
Tabela 13 – Resultado da transição entre regimes para partícula de duas esferas. ....	36
Tabela 14 – Ângulo de repouso medido e sua comparação para partícula de três esferas. ....	39
Tabela 15 – Melhores calibrações pelo ângulo de repouso para partícula de três esferas. ....	40
Tabela 16 – Resultado da transição entre regimes para partícula de três esfera. ....	42

## LISTA DE SÍMBOLOS

$g$	Aceleração da gravidade
$h_1$	Altura inicial do corpo em queda livre
$h_2$	Altura final do corpo em queda livre
$\theta_s$	Ângulo de repouso dinâmico
$AR_p$	Atrito de rolamento da partícula
$AE_s$	Coefficiente de atrito estático
$e_p$	Coefficiente de restituição
$\rho_p$	Densidade da partícula
$d$	Diâmetro da partícula
$D$	Diâmetro do tambor
$r_i$	Distância entre o de massa da partícula até o ponto de contato
$F$	Força aplicada sobre um corpo
$F_f$	Força de atrito
$F_{ij}$	Força de contato entre as partículas $i$ e $j$
$F_n$	Força normal
$F_n^E$	Força normal do modelo Hertz-Mindlin
$f$	Grau de enchimento do tambor
$m$	Massa
$G$	Módulo de cisalhamento
$E^*$	Módulo de Young
$I$	Momento de inércia
$F_r$	Número de Froude
$r$	Raio da partícula
$R$	Raio do tambor
$R_{ij}^*$	Raio equivalente entre duas partículas $i$ e $j$
$\nu_p$	Razão de Poison
$\delta_n$	Sobreposição normal das partículas
$\delta_t$	Sobreposição tangencial das partículas
$t_c$	Tempo crítico de integração
$\tau$	Torque
$\omega$	Velocidade angular

$\omega_c$	Velocidade crítica de centrifugação
$v_R$	Velocidade de onda de Rayleigh
$u$	Velocidade linear
$r_p$	Vetor de posição da partícula

### **SUBSCRITOS**

$c$	Condição crítica
$ij$	Interação entre a partícula $i$ e $j$
$pp$	Interação entre partículas
$pw$	Interação partícula e parede
$i$	Partícula $i$
$j$	Partícula $j$

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	OBJETIVOS .....	3
3	REFERENCIAL TEÓRICO .....	4
3.1	Visão geral e processamento do café .....	4
3.2	Tambor rotatório .....	7
3.3	Regimes de escoamento em tambor rotatório .....	8
3.4	Abordagem numérica lagrangeana – Simulação DEM.....	14
3.5	Parâmetros da simulação DEM.....	17
3.6	Clumps .....	20
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	21
4.1	Caracterização do grão de café .....	21
4.2	Definição dos tipos de partículas .....	21
4.3	Tambor rotativo e malha computacional .....	22
4.4	Parâmetros para simulação.....	23
4.5	Calibração dos coeficientes de atrito.....	24
4.5.1	Determinação do número total de partículas.....	25
4.6	Verificação do modelo .....	25
4.6.1	Medida do ângulo de repouso dinâmico ( $\theta_s$ ) .....	25
4.6.2	Velocidade de transição dos regimes .....	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	28
5.1	Calibração e ângulo de repouso da partícula de uma esfera .....	28
5.2	Transição entre regimes para partícula de uma esfera .....	30
5.3	Calibração e ângulo de repouso da partícula de duas esferas .....	33
5.4	Transição entre os regimes para a partícula de duas esferas.....	35
5.5	Calibração e ângulo de repouso da partícula de três esferas.....	38
5.6	Transição entre os regimes para a partícula de três esferas .....	41
5.7	Custo computacional.....	44
6	CONCLUSÕES .....	46
7	REFERÊNCIAS .....	47
8	APÊNDICES.....	51
8.1	Apêndice I .....	51
8.2	Apêndice II.....	51
8.3	Apêndice III .....	52
8.4	Apêndice IV .....	52

## 1 INTRODUÇÃO

O café é uma das bebidas mais consumidas em todo o mundo, segundo o relatório sobre o mercado de café publicado em dezembro de 2022 pela Organização Internacional do Café (OIC). Estima-se que o consumo mundial de café sob o período da safra de 2021/22 foi de 170,3 milhões de sacas de 60 kg. A bebida produzida a partir dos grãos da fruta de mesmo nome é importante fonte de cafeína, antioxidantes e outros compostos bioativos que podem ter efeitos benéficos para a saúde humana.

Atualmente, o Brasil é classificado como o maior produtor do grão e de acordo com o relatório da safra brasileira publicado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) em janeiro de 2023 a área total destinada à cafeicultura neste ano totaliza 2,26 milhões de hectares. Segundo a OIC, o café é a segunda *commodity* mais comercializada no mundo, ficando atrás apenas do petróleo. No ano de 2022, o Brasil exportou cerca de 39,8 milhões de sacas de 60 quilos de café, sendo essa quantidade correspondente a um valor estimado de US\$ 9,2 bilhões. Ressalta-se que exportação do café brasileiro atingiu 145 países, sendo Estados Unidos e Alemanha os principais destinos (CONAB, 2023).

No que diz respeito à cadeia produtiva no Brasil, o café abrange 5 setores: produção, indústria de torra, indústria de solúvel, comércio (nacional e internacional) e por fim ao consumidor (MATIELLO et al, 2016). A cadeia agroindustrial do grão aborda desde a etapa de plantio passando pelo processo de secagem (que também abrange a produção na propriedade rural), os processos de beneficiamento e comercialização, seguindo para as indústrias torrefadoras e solubilizadoras (VIEIRA et al., 2001).

O processamento pós-colheita do café é realizado por meio de dois métodos distintos: processamento via seca ou via úmida. O método via seca é a técnica mais antiga, na qual os grãos de café são colhidos e levados diretamente aos terreiros sem sofrer alterações adicionais (BORÉM, 2008). Já o método em via úmida envolve a remoção total ou parcial de algumas partes do fruto do café, como mucilagem e casca (ZAMBOLIM, 2004).

Tanto o café processado em via seca quanto em via úmida deve passar pelo processo de secagem do grão. Tradicionalmente, a secagem é realizada ao sol de forma natural. No entanto, o método exige bastante mão de obra, um tempo alto de operação e grande dependência das condições climáticas. Como uma possibilidade de adiantar a operação da colheita, permitir colher café de melhor qualidade, e possibilitar ao pequeno produtor um novo destino às áreas ocupadas pelos terreiros, a secagem mecânica surge como uma ferramenta que vai de encontro aos interesses dos produtores.

Entre os principais secadores utilizados estão os secadores rotatórios. Durante o processo, o equipamento gera um escoamento forçado dos materiais granulares em seu interior, atingindo certos regimes dependendo da velocidade de rotação e interações das partículas no sistema.

A otimização dos processos de secagem é crucial para atuar no desenvolvimento de técnicas mais eficientes não só para o tratamento de café, mas para outros tipos de grãos. Sendo assim, entender as diferentes formas de escoamento dos materiais granulares no interior de secadores é uma das chaves principais para melhorar o desempenho dos equipamentos, o que se mostra ser uma complexa combinação de partículas sendo levantadas e lançadas umas contra as outras e contra as paredes do tambor (MELLMANN, 2001).

Frente a isso, as simulações computacionais são uma ferramenta valiosa para o estudo de escoamento, pois possibilitam a obtenção de informações em qualquer ponto do processo abordado e são mais econômicas na validação de diferentes configurações de equipamentos e propriedades do sistema (PATANKAR, 1980; MACHADO, 2016).

Uma das metodologias mais empregadas atualmente para a simulação e estudo de escoamento de grãos em processos é o DEM (*Discrete Element Method*), em que cada partícula é considerada individualmente nos cálculos, sendo possível analisar seu posicionamento, velocidade, forças de contato, entre outras características do sistema (NASCIMENTO, 2014).

A principal vantagem da utilização da metodologia DEM é a obtenção de informações a níveis microscópicos da dinâmica dos materiais particulados dentro de um equipamento. Contudo, isso requer uma caracterização da partícula estudada, incluindo propriedades físico-químicas e os fatores de forma.

No DEM considera-se que todas as partículas são esferas perfeitas. Mas em caso de partículas não esféricas como o café, é possível modelar a partícula como uma combinação de outras partículas esféricas. Para isso, são modelados aglomerados de esferas, denominados *clumps*, que agem como um corpo rígido com contornos deformáveis (SHAMSI E MIRGHASEMI, 2012).

Quanto mais partículas esféricas de menores diâmetros são utilizadas melhor a representação da partícula que se deseja simular. No entanto, no DEM, como cada partícula é considerada isoladamente, quanto mais esferas são colocadas, maior o custo computacional. Dessa maneira, um grande desafio é usar o mínimo número possível de esferas para a formação do *clump* e ainda manter as propriedades de escoamento que são influenciadas pela forma da partícula.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da construção de diferentes partículas de café na simulação do escoamento dos grãos através de simulações computacionais utilizando a abordagem DEM. Para isso, haverá uma calibração de cada partícula construída a fim de se obter as propriedades que levam a um ângulo de repouso dinâmico próximo ao experimental. Para se alcançar o objetivo principal, serão realizados os seguintes objetivos específicos:

- Realizar caracterização dos grãos de café e a construção de diferentes partículas que o representam na simulação;
- Realizar a calibração dos coeficientes de atrito estático (partícula-partícula e partícula-parede) e dos coeficientes de atrito de rolamento (partícula-partícula e partícula-parede) para encontrar as propriedades que melhor representam a partícula real;
- Realizar simulações da dinâmica de partículas em tambor rotatório variando a velocidade de rotação;
- Comparar os resultados obtidos para validar se o regime de cascadeamento foi alcançado em condições semelhantes às experimentais com os mesmos parâmetros já calibrados em outra velocidade.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

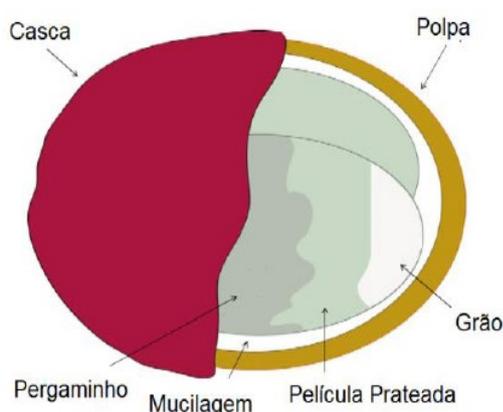
#### 3.1 Visão geral e processamento do café

O café é considerado uma das *commodities* agrícolas de maior relevância no mundo, sendo superado apenas pelo petróleo e isso o faz uma das especiarias de exportação mais valiosas atualmente. Além disso, segundo dados do relatório da OIC a exportação global do café verde em novembro de 2022 totalizou 9,21 milhões de sacas, que se comparado ao mesmo mês do ano anterior teve um aumento de 10,8%, valor que ressalta a crescente busca pelo grão.

Muitas espécies do fruto já foram identificadas, contudo duas delas predominam a produção mundial com um valor em conjunto estimado de 98% de todo café produzido, são elas *Coffea Arabica* (café arábica) e *Coffea Canephora* (café robusta) (Geeraert et al., 2019). Os consumidores geralmente preferem o café arábica por causa de suas características organolépticas, como aroma e sabor.

De acordo com Angeloni (2019), foram identificados mais de 1000 compostos responsáveis por essas características, e, além disso, estudos estão sendo realizados para avaliar a qualidade da bebida em relação às propriedades físicas dos grãos. Na Figura 1 ilustra-se a morfologia do fruto do café.

Figura 1 – Representação do fruto do café.



Fonte: Adaptado de ESQUIVEL e JIMÉNEZ, 2009.

De acordo com a Figura 1, a cereja do café possui externamente uma casca lisa, chamada também de exocarpo, que envolve uma segunda camada de tecido translúcido e viscoso, conhecido como polpa ou mucilagem, e, cientificamente como mesocarpo. Em seguida tem-se

o endocarpo que é formada por fibras esclerenquimáticas alongadas de aspecto pergaminoso que envolvem os dois hemisférios da semente (ESQUIVEL e JIMÉNEZ, 2012).

A maturação do fruto envolve reações químicas e bioquímicas que atingem níveis máximos de atividade quando as concentrações de etileno estão no auge. Isso leva a alterações em seu metabolismo, como o aumento de açúcares e ácidos, diminuição da clorofila e mudança da pigmentação de verde para vermelho-cereja ou amarelo. Além disso, ocorre a redução da adstringência e a formação de compostos que contribuem para o aroma, como aldeídos, ésteres, cetonas e álcoois (PIMENTA, 2003).

Portanto, o café passa por várias etapas de maturação, contudo a colheita ideal é realizada no estágio cereja em que sua composição química é favorável para obtenção de produtos de maiores qualidades. Nesse estágio algumas enzimas estão mais ativas, os grãos são mais densos e há altas concentrações de açúcares (PIMENTA, 2003).

Além disso, durante todo o processo de maturação o fruto atinge diversos níveis de umidade, com variação de 50% a 70% (base úmida) para os frutos no estágio cereja, de 35% a 50% para os frutos "passa" e de 16% a 30% para os frutos secos no cafeeiro. Contudo, para serem armazenados após a colheita, os grãos não podem conter uma quantidade de água alta a fim de evitar a fermentação e o crescimento de fungos, bem como a produção subsequente de microtoxinas. Sendo assim, faz-se necessária a secagem, a qual ainda é o método de preservação do alimento mais utilizado (BORÉM, 2008).

Atualmente, o processamento pós colheita é dividido em dois tipos: via seca e via úmida. A via seca é o tipo de técnica mais antiga em que não há nenhuma alteração nos grãos de café, eles são colhidos e levados direto para os terreiros (BORÉM, 2008). Já a via úmida, é caracterizada pela remoção da casca e mucilagem (exocarpo), descrevendo três maneiras de processamento diferentes que geram tipos de cafés diferentes (ZAMBOLIM, 2004).

O café descascado é obtido através da remoção mecânica da casca e uma pequena parcela da mucilagem, já o café desmucilado é resultado do processo em que tanto a casca quanto a mucilagem são removidas mecanicamente por completo, e por fim o café despulpado é aquele em que o fruto é descascado mecanicamente e a mucilagem remanescente é retirada via fermentação (BORÉM, 2008).

As bebidas que são provenientes de cafés processados através da via seca são dotadas de maiores teores de sólidos solúveis e açúcares redutores totais, conferindo mais corpo à bebida (MATIELLO et al., 2016). Além disso, Illy e Viani (1995) afirmam que os cafés despulpados são caracterizados por serem mais ácidos e bem menos encorpados que os naturais. Portanto, a composição química do café é fortemente influenciada pelo tipo de processamento

aplicado, apresentando características bem diferentes da qualidade do produto final (KNOOPP et al., 2006; BORÉM, 2008).

Durante muito tempo a única metodologia conhecida para a secagem de grãos era por ação de raios solares em terreiros, que é conhecida como secagem natural. Porém, por se tratar de uma das etapas mais críticas do processamento, e principalmente por aumentar as possibilidades de inviabilização dos grãos por contaminação e não proporcionar muito controle ao processo, esse tipo de secagem vem sendo cada vez mais substituído pela secagem mecânica.

Contudo, a secagem em terreiro não está em total desuso. Estudos mostram que uma etapa de pré-secagem em terreiro, além de reduzir gastos com energia na secagem mecânica podem ter influência em uma melhor qualidade do produto final. Isso acontece porque o grão apresenta menores valores de lixiviação de potássio, se submetido a essa pré-secagem de três dias (BORÉM, 2006).

Sendo assim, entre outras etapas, durante o processo de beneficiamento do café destaca-se a secagem. A secagem pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de energia e massa entre o produto e ar de secagem, que consiste na remoção do excesso de água contida no grão por meio da evaporação (BROOKER, 1992).

A utilização de secadores mecânicos permite uma secagem mais rápida em comparação com o método de secagem ao sol, tornando-se viável mesmo durante períodos chuvosos e em regiões úmidas. Além disso, essa abordagem evita interferências climáticas que poderiam afetar a qualidade do café, reduz a necessidade de espaços extensos para terreiros e demanda menos mão de obra. No entanto, é importante destacar algumas limitações, como o maior investimento em equipamentos e os custos adicionais de energia ou lenha para o funcionamento desses secadores (MATIELLO, 1991).

Dentre os secadores mecânicos usados para a secagem dos grãos de café, destacam-se os secadores rotatórios. Esses equipamentos são constituídos de cilindros que giram em torno do seu eixo longitudinal e promovem contato entre os grãos e o ar de secagem de maneira uniforme.

Para simplificar o estudo fluidodinâmico de secadores rotatórios, geralmente são feitos estudos preliminares em tambores rotatórios, sem a passagem do ar de secagem (MACHADO et al., 2016; SUNKARA et al., 2013; NASCIEMNTO et al., 2021). Além de auxiliar no entendimento fluidodinâmico do equipamento, em processos industriais de secagem, o tambor rotatório é objeto de muitos estudos para otimização do processamento e escoamento de grãos de café.

### 3.2 Tambor rotatório

Os tambores rotatórios são, geralmente, cilindros simples que giram em torno de seu eixo central de modo a movimentar o material em seu interior. Eles são amplamente utilizados para o processamento de materiais granulares em diversos segmentos de indústrias, tais como mineral, farmacêutica, de cerâmica, de cimento e de alimentos (CHOU e HSIAU, 2012). A Figura 2 a seguir é uma representação de um tambor rotatório de bancada.

Figura 2 – Representação de um tambor rotativo.



Fonte: Brandão (2019).

Esses equipamentos possuem uma ampla aplicação em processos como mistura de pós, secagem, calcinação, revestimento, pirólise, granulação, moagem, pois possuem a característica de proporcionar simultaneamente a troca de calor e massa (FANTOZZI et al., 2007). Essa versatilidade em processos pode também ser explicada devido à sua capacidade de lidar com diferentes tipos de matérias-primas, sejam elas úmidas ou secas, esféricas ou não-esféricas, além de suportarem grandes quantidades de material.

Embora sua geometria e operação sejam simples, o escoamento granular em tambores rotatórios apresenta grande complexidade. De acordo com Mellmann (2001), a movimentação da fase particulada no interior destes cilindros é função de certas variáveis operacionais e dos elementos presentes no interior dos tambores. Dentre as características da partícula destacam-se a esfericidade, diâmetro, densidade e propriedades friccionais (atrito partícula-partícula e partícula-parede). Já sobre o equipamento existem variáveis como o raio interno do cilindro e seu grau de enchimento.

A depender da combinação dessas variáveis podem surgir no interior dos tambores rotatórios diferentes interações, tanto das partículas entre si quanto das partículas com as

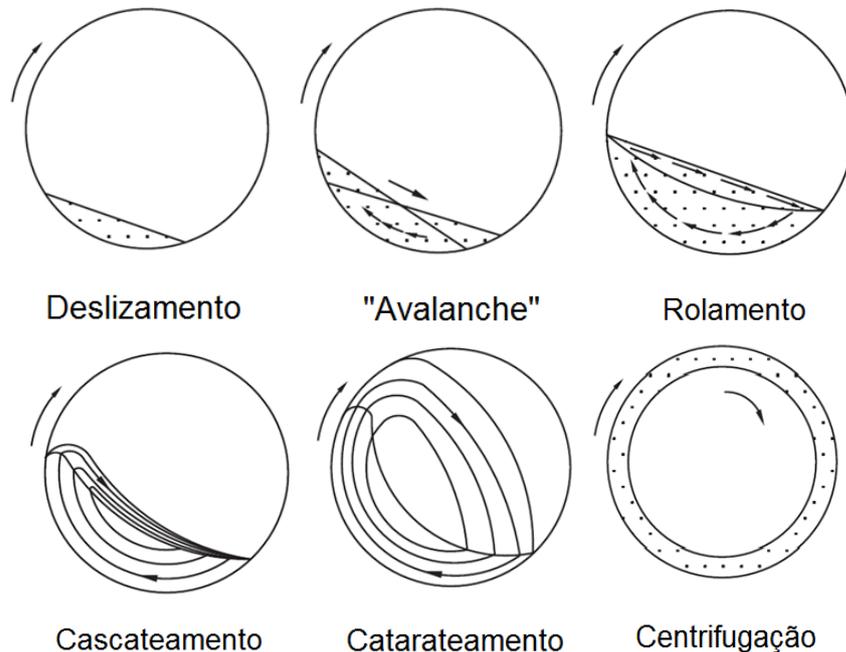
paredes do equipamento, as quais geram regimes de escoamento distintos que influenciam diretamente nos resultados do processo.

### 3.3 Regimes de escoamento em tambor rotatório

Baseado no movimento das partículas, o comportamento do fluxo granular em um tambor rotatório pode ser identificado através vários regimes de escoamento. Sendo assim, a conduta da movimentação, bem como, os mecanismos de mistura e segregação das partículas podem ser diferentes em cada um desses regimes (MELLMANN, 2001). O fluxo radial das partículas é causado pela rotação do tambor, a qual é uma das variáveis que mais influenciam a transição dos regimes.

Sendo assim, a Figura 3 a seguir apresenta uma representação dos 6 regimes de escoamento atingidos pela movimentação dos sólidos no interior do tambor, os quais foram estudados e propostos por Mellmann (2001).

Figura 3 – Regimes de escoamento em tambor rotativo.



Fonte: Adaptado de CHOU e HSIAU (2012).

Para uma melhor caracterização do regime de fluxo de partículas esféricas em tambor rotativo, Mellmann (2001) propôs a utilização do número de Froude ( $F_r$ ) que representa a relação entre as forças centrífuga e gravitacional. O adimensional é dado pela Equação (1) a seguir, em que  $\omega$  representa a velocidade angular de rotação do tambor,  $R$  representa o raio do tambor e  $g$  a aceleração gravitacional.

$$F_r = \frac{\omega^2 R}{g} \quad (1)$$

Juntamente ao número de Froude, Mellmann (2001) propôs a consideração do fator de enchimento ( $f$ ) do tambor para a caracterização e previsão dos regimes de escoamento, conforme apresentado na Tabela 1. Contudo, segundo o autor, essas faixas devem ser utilizadas somente de orientação quanto à transição entre os regimes, uma vez que se espera que as propriedades físicas das paredes e reológicas do material particulado utilizado também influenciem nas transições (HEINEN et al., 1983).

Tabela 1 – Classificação dos regimes de escoamento

Regime	Número de Froude	Grau de enchimento	Condição de atrito	Aplicação
Deslizamento	$0 < F_r < 10^{-4}$	$f < 0,1$	$AE_{pw} < AE_{pw,c}$	-
Avalanche	$10^{-5} < F_r < 10^{-3}$			Fornos,
Rolamento	$10^{-4} < F_r < 10^{-2}$	$f > 0,1$	$AE_{pw} > AE_{pw,c}$	reatores,
Cascadeamento	$10^{-3} < F_r < 0,1$			secadores,
Catarateamento	$0,1 < F_r < 1$	$f > 0,2$		misturadores
Centrifugação	$F_r \geq 1$			Moinhos
				-

Fonte: Adaptado de Mellmann (2001).

Na tabela, as condições de atrito são relações entre o atrito estático da partícula com a parede do equipamento ( $AE_{pw}$ ) com uma condição crítica do parâmetro ( $AE_{pw,c}$ ), os quais serão apresentados e explicados nos próximos tópicos.

De acordo com Mellmann (2001) e Hein et al. (1983) os regimes mais utilizados nas indústrias são o de avalanche, rolamento e cascadeamento em processos como mistura, granulação, secagem e recobrimento, enquanto que o regime de cascadeamento tem a principal aplicação em processo de moagem. Já os regimes de deslizamento e centrifugação não apresentam aplicação prática e, portanto, devem ser evitados.

A seguir cada um dos regimes de escoamento será apresentado, com detalhes e características do movimento das partículas.

- Regime de deslizamento

O primeiro regime identificado em uma progressão de velocidade de rotação é o regime de deslizamento. Esse regime é caracterizado pela formação de um leito estático do material particulado, que desliza sob a parede do equipamento. Tal comportamento das partículas pode ser comparado à um corpo rígido deslizante. Isso acontece principalmente devido a combinação de um atrito estático entre parede e partícula baixo, ou seja, uma superfície lisa, e uma baixa velocidade de rotação (HEMA, 2003).

Como praticamente não existe movimentação das partículas, apenas a ação de deslizamento, não há nenhum grau de mistura do material. Por isso esse regime não tem aplicação industrial e é fortemente evitado.

- Regime de avalanche

Com um pequeno incremento da velocidade de rotação e/ou da rugosidade da parede do tambor o regime o regime de avalanche é alcançado. O material particulado continua comportando-se como um corpo rígido, entretanto elas são transportadas pela parede do cilindro de tal modo que a inclinação da superfície do leito aumenta continuamente até atingir um ângulo superior ao de repouso. Em sequência, as partículas na parte superior do leito, caem como uma “avalanche” em direção à parte inferior do leito, atingindo um ângulo de repouso inferior, o qual é que o ângulo de repouso estático do sólido granular.

Além disso, observa-se certa mistura devido às constantes “avalanches” do material após atingir um ângulo superior de repouso. De acordo com Liu et al. (2005), a principal variável que influencia significativamente os ângulos de repouso é a razão entre o diâmetro da partícula e o diâmetro do tambor ( $d/D$ ), sendo essas grandezas diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior a razão entre os diâmetros, maior o valor dos ângulos.

Por outro lado, segundo Hema (2003), a frequência das quedas é dependente da velocidade de rotação do tambor, além dos diâmetros do tambor e da partícula. Contudo a principal variável é a velocidade de rotação, que, se aumentada gera uma frequência mais elevada das quedas, conduzindo eventualmente ao próximo regime, o de rolamento.

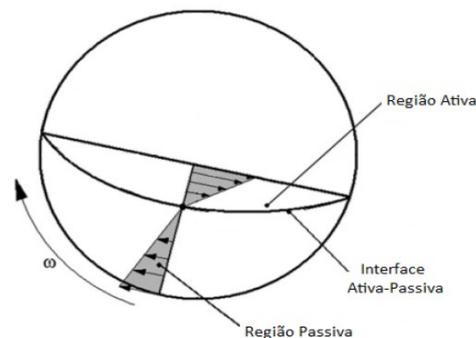
- Regime de rolamento

À medida que a velocidade de rotação aumenta, ocorre a transição para o regime de rolamento, em que não é mais possível identificar quedas do tipo de “avalanche”, pois o material particulado está em constante movimento. Esse fluxo uniforme é característico do regime em que as partículas rolam umas sobre as outras sob a forma de uma superfície aproximadamente plana, que apresenta uma inclinação constante caracterizando o ângulo de repouso dinâmico do material ( $\theta_s$ ).

O ângulo de repouso dinâmico também pode ser utilizado como um indicativo sobre a facilidade de escoamento do material particulado, quanto menor o ângulo mais facilmente o leito de partículas se deslocará. Além disso, esse parâmetro depende diretamente da rotação e do grau de enchimento do tambor (BLUMBERG, 1996).

Nesse regime, o leito de partículas pode ser dividido entre duas regiões de escoamento, como apresentado na Figura 4, sendo elas: região passiva e ativa. Na zona passiva, a parede do equipamento é responsável pelo movimento de arraste das partículas, as quais também se comportam como um corpo rígido acompanhando a rotação do tambor para cima, sendo que a taxa de mistura entre as partículas é insignificante. Já na zona ativa, a mistura do material é intensa, em que as partículas se movimentam no sentido oposto ao da região passiva, provocando o rolamento e é onde ocorrem os principais mecanismos de transferência de massa e energia (CHOU e HSIAU, 2012).

Figura 4 – Regiões passiva e ativa do regime de rolamento.



Fonte: Adaptado de AISSA et al. (2012)

A Figura 4, ademais, apresenta também a interface entre as regiões citadas anteriormente, e é justamente aqui que se encontra o ponto de inflexão do fluxo de partículas, a qual sobretudo é causada pelo movimento rotacional do tambor. Próximas desta região as partículas possuem velocidade praticamente nula comportando-se em trajetórias de vórtices. A partir da localização da interface passiva-ativa é possível encontrar a espessura da camada ativa, dada pela distância entre o ponto de inflexão e a superfície do leito de partículas (AISSA *et al.*, 2012; SANTOS et al, 2015).

Portanto este regime produz um bom grau de mistura de maneira uniforme, entretanto quando existe uma ampla faixa de distribuição de tamanho de partículas, pode-se ter um processo de segregação do material. Além disso, o grau de enchimento é a variável que apresenta a maior influência na transição dos regimes de rolamento para o cascadeamento e centrifugação (MELLMANN, 2001).

Diante do apresentado, grande parte dos processos industriais têm preferência pela utilização do regime de rolamento, visto que o regime fornece condições favoráveis para a transferência de calor e massa, garantindo um produto uniforme e de qualidade elevada.

- Regime de cascadeamento

Com um aumento ainda maior da velocidade de rotação do tambor, as partículas da superfície são movimentadas até uma posição mais elevada do equipamento. A partir do momento que se desprendem da superfície do tambor, traçando um trajeto de queda, e a superfície de partículas passa a assumir um formato de curva em “s” indica a transição de rolamento para cascadeamento (MELLMANN, 2001).

De acordo com Blumberg (1996), a transição entre os regimes rolamento-cascadeamento é fortemente influenciada pelo tamanho da partícula e nota-se que quanto maior o diâmetro da partícula maior a velocidade necessária para se atingir a transição. Além deste, o grau de enchimento do equipamento também influencia na transição entre os regimes (MELLMANN, 2001).

- Regime de catarateamento

A partir de uma velocidade de rotação ainda maior o formato em S do leito de partículas em regime de cascadeamento se torna cada vez mais expressivo, e as forças centrífugas se tornam tão intensas que partículas individuais começam a ser projetadas para o espaço livre do tambor (AISHA *et al.*, 2012; HEMA, 2003). Este processo caracteriza a transição para o regime de catarateamento, e segundo Heinen et al (1983) o cálculo da trajetória da partícula é um critério adequado, principalmente adotando-se a premissa de que as partículas lançadas no ápice do leito do material caem no ponto médio da superfície oposta, ou além.

De acordo com Mellmann (2001), conforme a velocidade de rotação aumenta o comprimento da trajetória e o número de partículas que são lançadas também aumentam, formando algo semelhante a um “véu” ao longo da seção transversal do equipamento. Além disso, segundo o autor, é quanto menor o ângulo dinâmico de repouso do material, maior o deverá ser o grau de enchimento se para alcançar o regime de catarateamento.

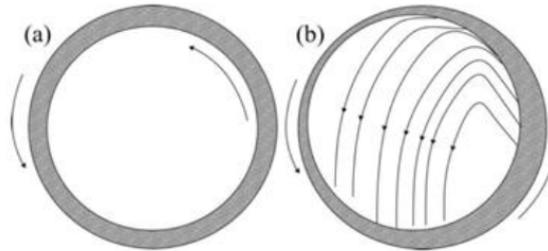
- Regime de centrifugação

Por fim, o último regime que pode ser atingido no escoamento de partículas, logo após o catarateamento, é o de centrifugação. Nele as partículas se aderem à parede do equipamento e o movimento relativo entre elas é minimizado.

Contudo, de acordo com Watanabe (1999), a transição entre os regimes pode ser definida de duas maneiras distintas conforme apresentado na Figura 5. A primeira definição considera que a centrifugação se inicia apenas quando o leito de partículas em sua totalidade se

adere à parede do cilindro formando um anel, já a segunda afirma que a centrifugação é alcançada quando uma primeira camada de partículas se prende à parede do equipamento.

Figura 5 – Definições do regime de centrifugação



(a) Quando todas as partículas estão aderidas à superfície e (b) quando apenas a camada mais externa de partículas está aderida à parede do tambor. Fonte: SANTOS (2015).

Mellmann (2001) afirma que o estágio final da centrifugação só é alcançado quando todo o material particulado entra em contato com a parede do cilindro, tornando-se uma camada uniforme. Contudo, quando se tem a camada mais exterior do leito aderida à parede, o material já não mais participa dos processos de transferência, sendo assim é considerado que o regime de centrifugação já foi alcançado.

No regime, as forças centrífuga e gravitacional que atuam sobre as partículas entram em equilíbrio. Segundo a mecânica clássica, esse equilíbrio é alcançado quando o número de Froude ( $F_r$ ) se iguala a um, e assim é obtida a Equação (2) que representa a velocidade crítica de centrifugação ( $\omega_c$ ), em que  $g$ , a aceleração da gravidade e  $R$ , o raio do tambor.

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g}{R}} \quad (2)$$

A Equação (2) não considera parâmetros de interação entre as partículas, nem com as paredes do equipamento. E ainda, de acordo com Chadwick e Bridgwater (1997) ela só pode ser utilizada para ver a velocidade crítica em um tambor que opera sem nenhum tipo de inclinação, ou seja, sua disposição deve ser na horizontal.

Sendo assim, muitos autores dedicaram suas pesquisas para estudar a influência de outros parâmetros na velocidade crítica de centrifugação, como por exemplo Rose e Sullivan (1975) que propuseram um modelo que considera um fator de tamanho das partículas em escoamento, representado pela Equação (3), em que  $D$  é o diâmetro do tambor,  $d$  o da partícula e  $g$  a aceleração da gravidade.

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g}{D-d}} \quad (3)$$

Por outro lado, Walton e Braun (1993) apresentaram a Equação (4), que acrescenta o ângulo de repouso dinâmico do material ( $\theta_s$ ) o qual leva em consideração o comportamento das partículas do material frente ao escoamento em tambor rotatório, observado no regime de rolamento.

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g}{R \sin \theta_s}} \quad (4)$$

Já Ristow (1998) apresentou um modelo que considera os efeitos do fator de enchimento do tambor na velocidade crítica de centrifugação, representado pela Equação (5). Esse efeito também foi fortemente defendido pelos autores Mellmann (2001) e Watanabe (1999).

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g}{R\sqrt{1-f}}} \quad (5)$$

Além dessas equações, outros autores como Juarez et al. (2011) propuseram um modelo que considera o efeito das densidades das partículas e do fluido de preenchimento do tambor, muito utilizado para prever a velocidade crítica em moinho de bolas, visando processos de moagem.

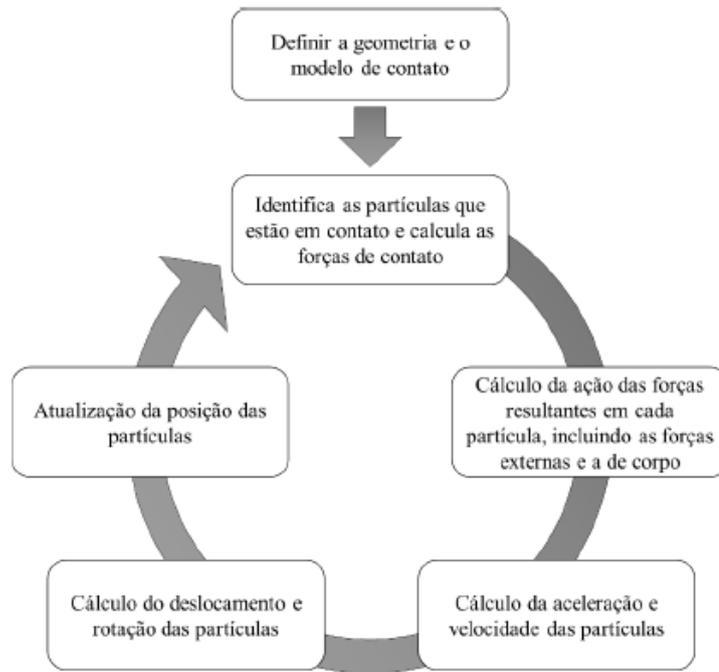
Trabalhos envolvendo simulações numéricas tem se destacado ao longo dos anos e são mencionados como metodologias de estudo dos regimes de escoamento em tambor rotatório. Essas ferramentas surgem como uma alternativa para superar possíveis limitações presentes nos estudos experimentais, além de proporcionar resultados mais precisos do comportamento das partículas nos equipamentos.

### 3.4 Abordagem numérica lagrangeana – Simulação DEM

Entre as abordagens numéricas utilizadas para descrever o comportamento de materiais particulados e granulares, destaca-se o Método dos Elementos Discretos, do inglês *Discrete Element Method* (DEM). Esta abordagem é a mais usada para esse tipo de processo, pois ela avalia cada partícula individualmente nos cálculos, sendo possível a obtenção de informações a níveis microscópicos da dinâmica dos materiais particulados (NASCIMENTO, 2014).

A metodologia do DEM foi desenvolvida por Cundall e Strack (1979) enquanto estudavam fraturas de rochas. O método inicialmente foi aplicado em trabalhos bidimensionais em que as partículas rígidas eram tratadas como discos ou esferas e atualmente se estende para processos tridimensionais. Em cada passo de tempo, as forças de interação entre as partículas e o deslocamento individual são acompanhados, conforme ilustra a Figura 6.

Figura 6 – Algoritmo da abordagem DEM.



Fonte: LIMA (2017).

Os cálculos realizados pelo DEM representam os movimentos de rotação e translação das partículas, utilizando-se como premissa a Segunda Lei de Newton como apresentado nas Equações (6), (7) e (8) (LIU et al., 2013).

$$m_i \frac{du_i}{dt} = \sum_i F_{ij} + m_i g \quad (6)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = - \sum_i r_{pi} F_{nij} \times F_{ij} \quad (7)$$

$$\frac{dr_{pi}}{dt} = u_i \quad (8)$$

Em que:

$m_i$  = massa da partícula  $i$ ;

$\omega_i$  = velocidade angular da partícula  $i$ ;

$F_{ij}$  = força de contato entre as partículas i e j;

$g$  = aceleração da gravidade;

$u_i$  = velocidade linear da partícula i;

$I_i$  = momento de inércia;

$r_{pi}$  = vetor de posição da partícula i;

$F_{nij}$  = vetor normal unitário na linha que passa pelo centro das partículas i e j.

Para a representação da lei de força-deslocamento existem dois modelos que são mais utilizados para simulações em DEM: modelo linear mola-amortecedor (*linear spring-dashpot model*) e o modelo não linear de Hertz-Mindlin. Sendo o segundo modelo o utilizado na maioria das simulações por levar em consideração o formato das partículas, além de ser mais apropriado para alta concentração granular, pois permite que as partículas se sobreponham umas sobre as outras durante o contato, contabilizando assim as deformações do material (RENZO e MAIO, 2005).

No modelo de colisão Hertz-Mindlin, a componente normal da força é baseada na teoria de contato de Hertz (1882), enquanto a força tangencial é baseada no trabalho de Mindlin (1949). Tanto no cálculo da força normal, quanto da tangencial, há um termo de amortecimento do sistema, relacionado ao coeficiente de restituição. Renzo e Maio (2005) propuseram o modelo, que é essa relação não linear entre as forças e o deslocamento, conforme apresentado pelas Equações (9) e (10), em que  $E^*$  é o módulo de Young,  $R_{ij}^*$  o raio equivalente entre duas partículas i e j em contato e  $\delta$  é a sobreposição entre as partículas, tanto normal quanto tangencial.

$$F_n^E = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_{n,ij}^{3/2} \quad (9)$$

$$R_{ij}^* = \frac{r_i r_j}{r_i + r_j} \quad (10)$$

Após algumas simplificações e considerações a Equação (11) é obtida para a força tangencial, na qual  $G^*$  representa o módulo de cisalhamento.

$$F_t = -\frac{2}{3} (8G^* \sqrt{R^*} \delta_{n,ij}^{0,5}) \delta_{t,ij} \quad (11)$$

Para aplicações em que o atrito de rolamento ( $AR_p$ ) é importante, ele pode ser incluído ao modelo e estimado através da Equação (12) considerando-se o torque nas superfícies de

contato, em que  $r_e$  a distância entre o centro de massa da partícula até o ponto de contato e  $\omega_i$  é vetor unitário de velocidade angular da partícula.

$$\tau = -AR_p F_n^E r_e \omega_i \quad (12)$$

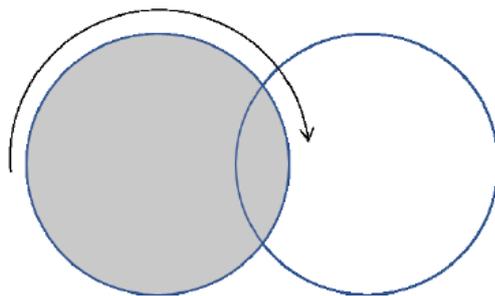
A modelagem DEM envolve a determinação de muitos parâmetros, sejam eles relacionados as propriedades físicas das partículas como massa, raio, densidade, modulo de cisalhamento, módulo de Young e razão de Poisson, ou parâmetros de interação como coeficiente de restituição, atrito estático e atrito de rolamento. O principal desafio da metodologia está na determinação desses parâmetros de interação das partículas, que pode ser realizada por medição direta ou por meio de um processo de calibração.

### 3.5 Parâmetros da simulação DEM

- Passo de tempo

A escolha de um passo no tempo adequado é de grande importância para garantir a estabilidade da solução. O movimento de cada partícula é afetado pela propagação das ondas de perturbação de sua vizinhança local, a qual é conhecida como onda de Rayleigh. Ela é definida como sendo a onda mecânica que percorre a superfície dos corpos elásticos, como mostra a Figura 7 (THORNTON, 2015).

Figura 7 – Propagação da onda de Rayleigh.



Fonte: BRANDÃO (2017).

Portanto, o tempo de integração em uma simulação DEM deve ser inferior ao necessário para que a onda de Rayleigh percorra a partícula de menor tamanho. De acordo com LI et al. (2016) as Equações (13) e (14) apresentam, a velocidade de onda de Rayleigh ( $v_R$ ) e o intervalo de tempo crítico de integração ( $t_c$ ), e ainda, Lima (2017) em seus estudos afirma que a literatura

recomenda a utilização de um passo de tempo de no máximo 20% do valor de tempo crítico de integração.

$$v_R = (0,1613 \cdot v_p + 0,8766) \sqrt{\frac{G}{\rho_p}} \quad (13)$$

$$t_c = \frac{\pi r^2 \sqrt{\rho_p / G}}{(0,1613 \cdot v_p + 0,8766)} \quad (14)$$

Nas equações anteriores,  $\rho_p$  é a densidade da partícula,  $G$  módulo de cisalhamento e  $v_p$  razão de Poisson, respectivamente.

- Coeficiente de restituição

A energia cinética conservada após o choque entre dois corpos sólidos pode ser mensurada através do coeficiente de restituição ( $e_p$ ). Esse parâmetro pode ser determinado através da Equação (15), em que a segunda lei de Newton foi aplicada considerando a força de resistência do ar desprezível para corpos em condição de queda livre, em que  $h_1$  e  $h_2$  são a altura inicial e final, respectivamente (BANDÃO, 2017).

$$e_p = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \quad (15)$$

Esse parâmetro apresenta o valor máximo de 1 para colisões perfeitamente elásticas, em que não há dissipação de energia, e o mínimo de 0 para colisões perfeitamente inelásticas, em que há a dissipação total da energia. Ambos os casos ocorrem apenas sob condições especiais, pois naturalmente existe uma dissipação gradual dessa energia (MACHADO, 2016).

- Coeficiente de atrito estático

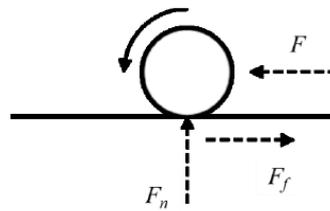
O coeficiente de atrito estático representa a razão entre a força resistente ao movimento tangencial entre dois corpos e a força normal entre eles. Ou seja, para que um corpo sólido se movimente em relação a outro a força de atrito é a força tangencial que deve ser ultrapassada. A Equação (16) é uma das formas de representar o coeficiente de atrito estático ( $AE_s$ ) em uma superfície plana, em que  $F$  é a força tangencial,  $m$  a massa da partícula e  $g$  a gravidade.

$$AE_s = \frac{F}{mg} \quad (16)$$

- Coeficiente de atrito de rolamento

Por fim, o coeficiente de atrito de rolamento é a resistência causada ao movimento de rolamento de uma partícula esférica sob um outro corpo rígido, sendo dependente de características dos materiais e tem magnitude bem menor que o coeficiente de atrito estático. A Figura (8) representa as forças envolvidas no sistema e fica evidente como acontece a atuação da força normal e de atrito sob o movimento (MATUTTIS e CHEN, 2014).

Figura 8 – Diagrama de forças de uma esfera em movimento.



Fonte: LIMA (2017).

A lei de Coulomb pode ser aplicada, e a Equação (17) é obtida, em que  $AR_p$  é o atrito de rolamento,  $F_f$  é a força de atrito e  $F_n$  a força normal. Além disso, quando a análise passa a ser realizada para o rolamento de um sistema particulado, o atrito passa ser representado em termos da força de torque, como na Equação (12).

$$F_f = AR_p F_n \quad (17)$$

Além disso, a Tabela 2 apresenta alguns valores de parâmetros usuais adotados por diferentes autores dependendo do tipo de equipamento e material utilizado.

Tabela 2 – Valores de parâmetros DEM presentes em diferentes trabalhos na literatura

Autor	Equipamento	Material	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$e_p$	$AE_s$	$AR_p$
Marigo e Stitt (2015)	Tambor rotatório	Óxido de alumínio <sup>1</sup>	1800 <sup>1</sup>	0,01 <sup>1,1</sup>	0,25 <sup>1,1</sup>	0,65 <sup>1,1</sup>
		Acrílico <sup>2</sup>	1000 <sup>2</sup>	0,85 <sup>1,2</sup>	0,6 <sup>1,2</sup>	0,65 <sup>1,2</sup>
Bian et al. (2017)	Moinho de bola	Aço <sup>1</sup>	7800 <sup>1</sup>	0,5 <sup>1,1</sup>	0,5 <sup>1,1</sup>	0,01 <sup>1,1</sup>
		Acrílico <sup>2</sup>	1200 <sup>2</sup>	0,4 <sup>1,2</sup>	0,5 <sup>1,2</sup>	0,01 <sup>1,2</sup>
		Plástico ABS <sup>1</sup>	1100 <sup>1</sup>	0,783 <sup>1,1</sup>	0,360 <sup>1,1</sup>	0,030 <sup>1,1</sup>
Xiao et al. (2017)	Tambor rotatório	Aço <sup>2</sup>	7850 <sup>2</sup>	0,981 <sup>1,2</sup>	0,382 <sup>1,2</sup>	0,021 <sup>1,2</sup>
		Acrílico <sup>3</sup>	1190 <sup>3</sup>	0,850 <sup>1,3</sup>	0,422 <sup>1,3</sup>	0,015 <sup>1,3</sup>
Kumar et al. (2015)	Tambor rotatório	Celulose Microcristalina <sup>1</sup>	1210 <sup>1</sup>	0,575 <sup>1,1</sup>	0,176 <sup>1,1</sup>	0,01 <sup>1,1</sup>
		Aço <sup>2</sup>		0,800 <sup>1,2</sup>	0,260 <sup>1,2</sup>	0,01 <sup>1,2</sup>

Fonte: Adaptado de Lima (2017).

### 3.6 Clumps

A maioria dos *softwares* de simulação DEM têm como *default* a consideração de que as partículas do sistema estudado são esferas, e somente a entendem como tal. Contudo, quando a forma da partícula é relevante para o escoamento, e por consequência para a simulação, há a necessidade da criação de um aglomerado de partículas esféricas conhecido como *clump*. Ele se comporta como um único corpo rígido com contornos deformáveis gerando uma simulação mais fiel à realidade (SHAMSI E MIRGHASEMI, 2012).

Como um exemplo de criação de *clump* para representação de uma partícula não esférica pode-se citar o trabalho de Resende (2017), em que a autora simulou um grão de café para estudos de escoamento com abordagem de DEM, como mostrado na Figura 9. Para a formação do *clump*, a autora usou cinco esferas com sobreposição.

Figura 9 – Grão de café e sua representação em forma de *clump*.



Fonte: RESENDE (2017).

Em seu trabalho, Resende (2017), não fez um estudo para otimizar o tempo de simulação, afim de verificar quantas partículas esféricas seriam necessárias para compor o *clump* do café.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado através de simulações computacionais feitas em dois computadores do Laboratório de Fluidodinâmica Computacional (LAN3) do departamento de engenharia química, utilizando a metodologia lagrangeana e da análise de seus resultados. Nessa seção serão apresentados a metodologia e os *softwares* utilizados para a execução.

### 4.1 Caracterização do grão de café

Foram consideradas as dimensões e características físicas da partícula de café determinadas por Resende (2017), o qual utilizou grãos de café descascados da variedade *Arabica* com qualidade de exportação. Portanto, a Tabela 3 apresenta as propriedades da partícula utilizada no trabalho, em que  $\rho_s$  a densidade real,  $D_{50}$  diâmetro médio,  $\varepsilon$  a porosidade do leito de partículas,  $AE_{pw}$  o coeficiente de atrito estático partícula-parede e  $\phi$  a esfericidade média.

Tabela 3 – Propriedades físicas do grão de café descascado.

Propriedade	Valor
$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	1368,3 ± 3,9
$D_{50}$ (mm)	5,24
$\varepsilon$ (-)	0,47 ± 0,01
$AE_{pw}$ (-)	0,72 ± 0,02
$\phi$ (-)	0,88

Fonte: Resende (2017).

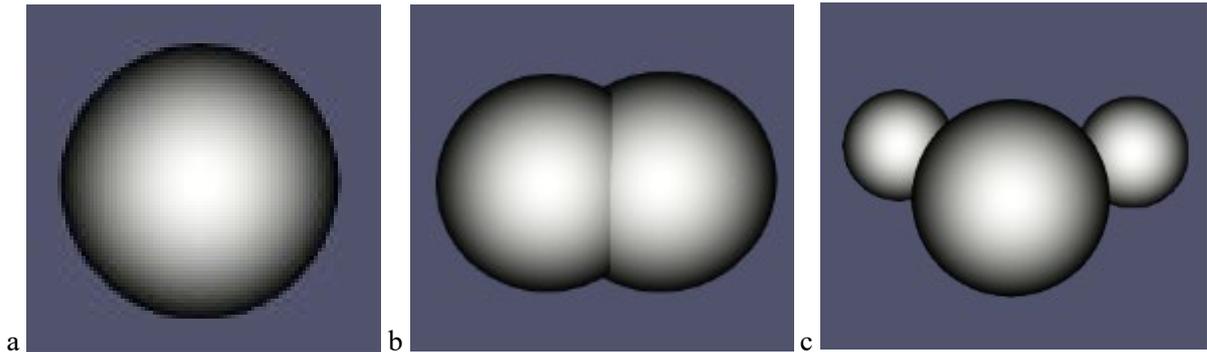
### 4.2 Definição dos tipos de partículas

Essencialmente os *softwares* de simulação operam com a consideração de que as partículas são esferas. Contudo para alcançar os objetivos do estudo foram criados 3 tipos de partículas diferentes que representaram a forma irregular da partícula real de café descascado, a partir de aglomerados de esferas, os *clumps*. Sendo assim, a partícula foi representada por uma, duas e três esferas.

Todas as partículas foram criadas com base no valor de diâmetro médio  $d_{50}$  de 5,24 mm obtido por Resende (2017) em seu estudo, de forma que a partícula criada, independente da

forma, fosse de igual volume. Além disso, alguns estudos e testes preliminares foram realizados para determinar a melhor disposição das esferas para a criação dos *clumps* de duas e três esferas. A Figura 10 apresenta as três partículas criadas no *software Liggghts*® por um script adequado e a visualização foi obtida pelo programa *Paraview*, utilizando a configuração de *Point Gaussian* para renderizar as partículas.

Figura 10 – Representações do café em forma de *clump*.



Fonte: Do autor (2023).

A partícula de uma esfera (10.a) possui diâmetro de 5,24 milímetros, igual ao diâmetro médio do café de verde. Já a segunda partícula (10.b) é composta por duas esferas idênticas de diâmetro igual a 3,49 milímetros cada, com uma sobreposição partindo do centro de ambas. Por fim, a terceira partícula (10.c) é composta por uma esfera central de diâmetro 3,28 milímetros e duas laterais de diâmetro 1,90 milímetros, dispostas a um ângulo de  $30^\circ$  em relação ao centro da esfera central e com uma leve sobreposição para criação do *clump*.

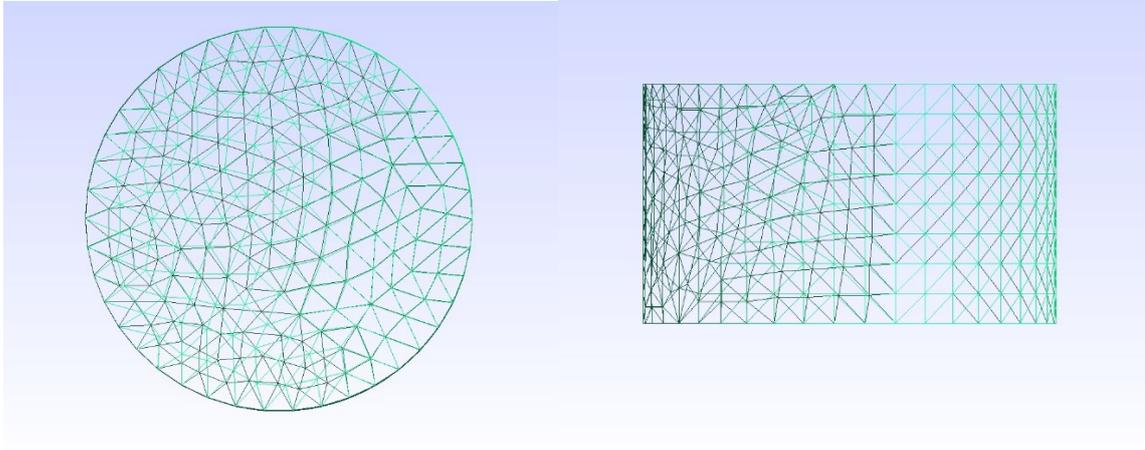
### 4.3 Tambor rotativo e malha computacional

A geometria do tambor rotativo também esteve de acordo com Resende (2017), em que foi utilizado um cilindro de diâmetro 21,5 cm e comprimento de 50 cm. Contudo, da mesma forma que Resende (2017), para fins de simplificação na simulação do presente trabalho o comprimento do tambor foi reduzido à 25% do original, sendo utilizado o valor de 12,5 cm. Além disso, cabe ressaltar que a parede interna do equipamento experimental de Resende (2017) foi revestida com uma lixa P80, afim de aumentar o atrito, o que não foi representado no presente trabalho.

O programa *Gmsh* foi utilizado para a construção da malha computacional do tambor com as dimensões já estabelecidas. Observa-se na Figura 11 uma imagem vertical e horizontal

da malha finalizada, e, conforme especificação do *software Liggghts®*, ela é criada apenas nas superfícies do equipamento e não no volume.

Figura 11 – Malha computacional criada no *software Gmsh*.



Fonte: Do autor (2023).

A malha aplicada à geometria do equipamento tem um total de 704 elementos triangulares e 354 pontos de nós, o que gerou uma superfície bem refinada.

#### 4.4 Parâmetros para simulação

O *software* utilizado para o cálculo das simulações foi o *Liggghts®*, em uma versão gratuita disponível para o sistema operacional Linux. Esse *software* utiliza-se dos cálculos envolvendo a metodologia lagrangeana e para o tratamento dos dados foi utilizado o programa *Paraview*, que permite a visualização das simulações.

Alguns parâmetros foram mantidos constantes e idênticos às suas medidas reais assim como as condições empregadas no estudo de Resende (2017) e estão listadas na Tabela 4. 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 4 – Parâmetros empregados na simulação Lagrangeana.

Módulo de cisalhamento	$5 \times 10^6$ Pa
Razão de Poison	0,25
Passo de tempo	20% do tempo de Rayleigh
Tempo de simulação	10 segundos

Fonte: Do autor (2023).

#### 4.5 Calibração dos coeficientes de atrito

Executou-se a calibração dos parâmetros relevantes para a movimentação de partículas em tambores rotatórios. A calibração é uma alternativa viável e muito utilizada uma vez que esses parâmetros são difíceis de serem determinados experimentalmente e através dela consegue-se tradicionalmente resultados fiéis aos experimentais (LIMA, 2017).

Foi criado 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 ( $AR_{pw}$ ). Sendo assim, os planejamentos foram criados seguindo os valores de variação dos parâmetros apresentados na Tabela 5, utilizando também um  $\alpha$  de 1,596 para as extrapolações.

Tabela 5 – Variação dos parâmetros nos planejamentos.

Número de esferas	Variação	$AE_{pp}$	$AE_{pw}$	$AR_{pp}$	$AR_{pw}$
1	-1	0,700	0,700	0,060	0,060
	0	0,800	0,800	0,105	0,105
	+1	0,900	0,900	0,150	0,150
2	-1	0,500	0,500	0,010	0,010
	0	0,700	0,735	0,020	0,020
	+1	0,900	0,970	0,030	0,030
3	-1	0,500	0,500	0,010	0,010
	0	0,700	0,735	0,020	0,020
	+1	0,900	0,970	0,030	0,030

Fonte: Do autor (2023).

Para cada uma das três partículas foi criado um PCC, o que gerou 26 simulações por planejamento, sendo um total de 78 simulações. As condições operacionais das calibrações foram baseadas no estudo de Resende (2017), sendo a velocidade de rotação 12,5 rpm e um fator de enchimento de 10%.

O fator de enchimento experimental do trabalho de Resende (2017) foi de 30%, contudo, a autora afirma em seu trabalho que o enchimento não influencia nos resultados da simulação em DEM para a faixa de fator de enchimento de 10% a 50%. Sendo assim, foi escolhido um enchimento de 10% pensando no custo computacional para a execução de todas as simulações.

#### 4.5.1 Determinação do número total de partículas

O *software Liggghts*® é configurado com uma definição da quantidade de partículas que estarão dentro do equipamento a ser analisado. Como mencionado anteriormente, foi estabelecido que o tambor estaria preenchido com 10% (em fração volumétrica -  $f$ ) de partículas. Assim, de acordo com as informações de densidade ( $\rho_s$ ), volume das partículas ( $V_s$ ), porosidade do leito ( $\varepsilon$ ) e com os dados do volume do tambor (raio  $R$  e comprimento  $L$ ), foi possível calcular o número total de partículas para cada tipo, pela Equação (18).

$$N^\circ \text{ total de partículas} = \frac{\pi R^2 L (1 - \varepsilon) f}{V_s} \quad (18)$$

Sendo os resultados apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Número total de partículas no tambor.

<b>Tipo de partícula</b>	<b>Número total</b>
1 esfera	3193
2 esferas	7389
3 esferas	9374

Fonte: Do autor (2023).

#### 4.6 Verificação do modelo

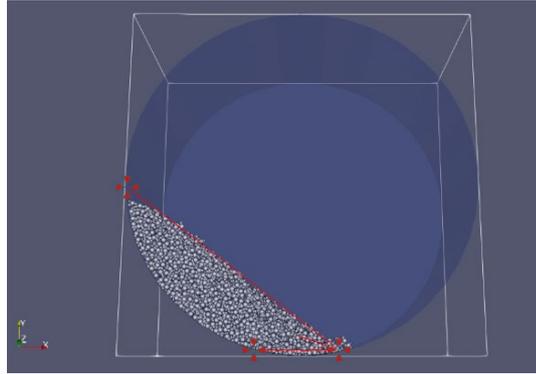
Para uma análise e verificação dos parâmetros calibrados, afim de validar que a combinação dos parâmetros realmente representa bem o comportamento real do café descascado em tambor rotatório, independentemente da velocidade trabalhada, serão utilizadas duas metodologias: análise do ângulo de repouso dinâmico e verificação de outros regimes de cascadeamento em velocidades de rotação distintas.

Foi retirado da literatura, mais especificamente do estudo de Resende (2017), os valores experimentais dos modelos que serão utilizados para validação da calibração. No trabalho citado, o ângulo de repouso do sistema em velocidade de rotação de 12,5 rpm foi de 37,4°.

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

Para a medida do ângulo de repouso dinâmico, primeiramente foi utilizado o *software Paraview* para a visualização do ambiente das simulações e em seguida o programa *Meazure*™ para análise do ângulo de repouso do leito, como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Medida do ângulo de repouso dinâmico utilizando-se o software *Meazure*<sup>TM</sup>.



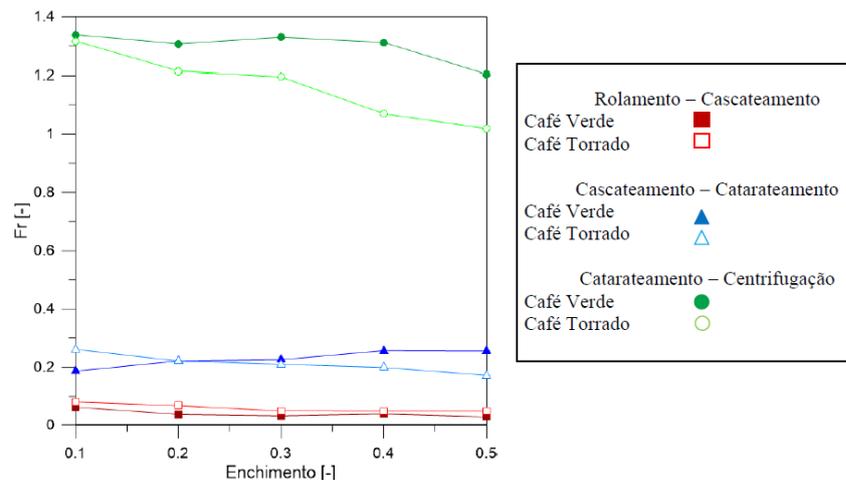
Fonte: Do autor (2023).

Para que os efeitos de perspectivas de visão lateral do tambor rotativo fossem diminuídos foi preciso alterar a angulação de visão das partículas em escoamento, como apresentado na figura 13. Além disso, a fim de se manter uma padronização do *frame* da simulação analisado, sempre foi medido o ângulo do último *frame* de simulação, ou seja, quando concluído os 10 segundos de simulação.

#### 4.6.2 Velocidade de transição dos regimes

As velocidades de transições entre os regimes também foram obtidas do estudo de Resende (2017) em que o experimento teve uma variação gradual da velocidade de rotação do tambor e estão expressas na Figura 13, que corresponde a um gráfico que relaciona o número de Froude ( $Fr$ ) e fator de enchimento ( $f$ ).

Figura 13 – Curvas de transição entre os regimes de escoamento.



Fonte: Resende (2017).

Ressalta-se que para o presente trabalho foram considerados apenas os valores referentes ao café descascado. Portanto, utilizando-se a Equação (1), foi possível calcular as velocidades de rotação para a transição entre os regimes, que estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Velocidade angular e período de transição entre os regimes.

<b>Transição entre regimes</b>	<b>Velocidade Angular (<math>\omega</math>) [rps]</b>	<b>Período [1/s]</b>
Rolamento – Cascateamento	0,38	2,67
Cascateamento – Catarateamento	0,66	1,52
Catarateamento - Centrifugação	1,74	0,57

Fonte: Do autor (2023).

O método utilizado para identificar a transição entre os regimes de escoamento foi baseado em observação visual, de acordo com as características apresentadas na seção 3.3 da revisão bibliográfica. É pertinente destacar que a centrifugação foi considerada iniciada quando a camada mais externa de partículas aderiu à parede do tambor, seguindo a definição proposta por Watanabe (1999).

Ressalta-se que para a primeira parte da calibração, todas as simulações foram executadas com as mesmas configurações de *input* do *software Liggghts®*, e características do sistema, sendo o fator de enchimento ( $f$ ) de 10% e a velocidade de rotação ( $\omega$ ) de 12,5 rpm. Apenas os valores dos coeficientes de atrito foram alterados entre as simulações, os quais são: 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 ( $AR_{pw}$ ).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Calibração e ângulo de repouso da partícula de uma esfera

Os resultados estão dispostos na Tabela 8, com o erro relativo ao valor de referência.

Tabela 8 – Ângulo de repouso medido e sua comparação para partícula de uma esfera.

<b>Exp</b>	<b>AE<sub>pp</sub></b>	<b>AE<sub>pw</sub></b>	<b>AR<sub>pp</sub></b>	<b>AR<sub>pw</sub></b>	<b><math>\theta_{s1}</math></b>	<b><math>\theta_{s2}</math></b>	<b>Média <math>\theta_s</math></b>	<b>Erro (%)</b>
1	0,7000	0,7000	0,0600	0,0600	29,70	31,20	30,45	18,6%
2	0,9000	0,7000	0,0600	0,0600	27,90	30,60	29,25	21,8%
3	0,7000	0,9000	0,0600	0,0600	29,80	29,40	29,60	20,9%
4	0,9000	0,9000	0,0600	0,0600	30,20	30,40	30,30	19,0%
5	0,7000	0,7000	0,1500	0,0600	30,40	30,40	30,40	18,7%
6	0,9000	0,7000	0,1500	0,0600	34,20	34,40	34,30	8,3%
7	0,7000	0,9000	0,1500	0,0600	31,50	31,30	31,40	16,0%
8	0,9000	0,9000	0,1500	0,0600	29,50	30,40	29,95	19,9%
9	0,7000	0,7000	0,0600	0,1500	30,90	29,40	30,15	19,4%
10	0,9000	0,7000	0,0600	0,1500	30,70	30,10	30,40	18,7%
11	0,7000	0,9000	0,0600	0,1500	32,50	31,90	32,20	13,9%
12	0,9000	0,9000	0,0600	0,1500	33,10	31,70	32,40	13,4%
13	0,7000	0,7000	0,1500	0,1500	33,50	32,00	32,75	12,4%
14	0,9000	0,7000	0,1500	0,1500	33,70	33,00	33,35	10,8%
15	0,7000	0,9000	0,1500	0,1500	34,50	33,90	34,20	8,6%
16	0,9000	0,9000	0,1500	0,1500	31,10	32,20	31,65	15,4%
17	0,6404	0,8000	0,1050	0,1050	30,10	29,60	29,85	20,2%
18	0,9596	0,8000	0,1050	0,1050	30,50	30,10	30,30	19,0%
19	0,8000	0,6404	0,1050	0,1050	32,60	32,40	32,50	13,1%
20	0,8000	0,9596	0,1050	0,1050	32,40	31,70	32,05	14,3%
21	0,8000	0,8000	0,03318	0,1050	30,60	30,10	30,35	18,9%
22	0,8000	0,8000	0,17682	0,1050	29,00	30,00	29,50	21,1%
23	0,8000	0,8000	0,1050	0,03318	30,30	30,00	30,15	19,4%
24	0,8000	0,8000	0,1050	0,17682	34,60	34,40	34,50	7,8%
25	0,8000	0,8000	0,1050	0,1050	33,10	33,40	33,25	11,1%
26	0,8000	0,8000	0,1050	0,1050	33,10	33,40	33,25	11,1%

Fonte: Do autor (2023).

Sendo assim, a primeira resposta avaliada foi o ângulo de repouso dinâmico do material, o qual foi medido em duplicata. O ângulo de repouso experimental de referência foi obtido por Resende (2017) como sendo o valor de  $37,4^\circ \pm 0,5^\circ$ , para as mesmas condições do sistema.

De acordo com os dados apresentados, é possível identificar uma dispersão grande dos desvios com relação ao valor experimental de Resende (2017), o que é esperado, por se tratar de uma metodologia de calibração dos parâmetros. Contudo, destacam-se três calibrações que obtiveram os melhores resultados, sendo elas as simulações 6, 15 e 24, as quais têm seus dados destacados na Tabela 9.

Tabela 9 – Melhores calibrações pelo ângulo de repouso para partícula de uma esfera.

<b>Exp</b>	<b>AE<sub>pp</sub></b>	<b>AE<sub>pw</sub></b>	<b>AR<sub>pp</sub></b>	<b>AR<sub>pw</sub></b>	<b>Média <math>\theta_s</math></b>	<b>Erro (%)</b>
6	0,9000	0,7000	0,1500	0,06000	34,3	8,3%
15	0,7000	0,9000	0,1500	0,15000	34,2	8,6%
24	0,8000	0,8000	0,1050	0,17682	34,5	7,8%

Fonte: Do autor (2023).

A combinação dos valores dos parâmetros dessas calibrações é diferente entre si, contudo olhando apenas para os coeficientes de atrito estáticos identifica-se que há um equilíbrio entre os valores, uma vez que o valor mediano seria o representado pela calibração 24 (AE<sub>pp</sub> e AE<sub>pw</sub> iguais a 0,8). As outras duas calibrações alternam os valores dos coeficientes entre 0,9 e 0,7.

Sobre o coeficiente de atrito de rolamento, identifica-se para calibração 24 o maior valor do PCC para o atrito entre a partícula e a parede, isso pode ser um indicativo de compensação dos valores de atrito de rolamento partícula-partícula ser um pouco mais baixo do que das simulações 6 e 15.

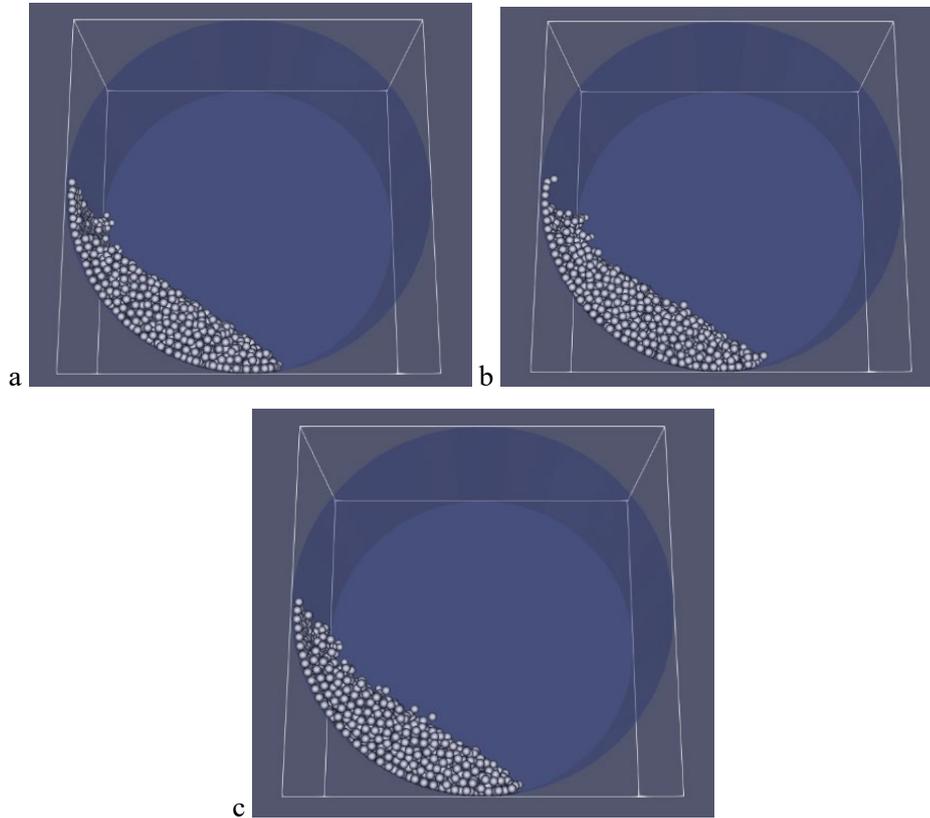
Esse comportamento de compensação é semelhante ao que acontece na calibração 6, contudo o valor do atrito de rolamento entre as partículas é maior que o atrito entre a partícula e parede, sendo que este último é o menor valor do PCC.

Comparando com os resultados de Resende (2017) observa-se que os valores de AE<sub>pp</sub> e AE<sub>pw</sub> são próximos aos encontrados neste trabalho. No entanto, ao utilizar uma única esfera para representar a partícula de café, é necessário usar AR<sub>pp</sub> e AR<sub>pw</sub> mais altos para dificultar o rolamento das partículas.

A seguir, na Figura 14, está apresentada o *frame* final das melhores calibrações citadas anteriormente, e a partir delas que foram medidos os ângulos de repouso. Além disso, no Apêndice I do trabalho contém um *QR code*, na Figura A.27, e um *link* que direcionam para um

vídeo que apresenta na íntegra uma das simulações realizadas nessa seção, mostrando o escoamento das partículas estudado.

Figura 14 – Simulações 6 (a), 15 (b) e 24 (c) do PCC de calibração dos parâmetros para a partícula de uma esfera



Fonte: Do autor (2023).

Como já mencionado, somente analisar o ângulo de repouso não é suficiente para obter conclusões satisfatórias sobre a simulação do sistema, uma vez que ele representa uma condição particular de velocidade de rotação. Logo, para verificar a aplicabilidade desses parâmetros em outras condições, as três melhores calibrações (6, 15 e 24) foram usadas para avaliar a transição entre os regimes de escoamento no tambor rotativo, como apresentado a seguir.

## 5.2 Transição entre regimes para partícula de uma esfera

Sendo assim, as calibrações 6, 15 e 24 foram simuladas novamente, porém o sistema foi colocado nas velocidades angulares (de rotação) de transição entre os regimes, apresentadas na Tabela 6. A partir disso, foi avaliado se as simulações atingiram as transições dos regimes por visualização do comportamento das partículas, e os resultados estão na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultado da transição entre regimes para partícula de uma esfera.

<b>Resende (2017)</b>	<b><math>\omega</math> [rps]</b>	<b>Exp</b>	<b>Regime observado</b>
Transição		6	Rolamento
rolamento -	0,38	15	Rolamento
cascadeamento		24	Rolamento
Transição		6	Transição rolamento-cascadeamento
cascadeamento -	0,66	15	Transição rolamento-cascadeamento
catarateamento		24	Transição rolamento-cascadeamento
Transição		6	Catarateamento
catarateamento -	1,74	15	Catarateamento
centrifugação		24	Catarateamento

Fonte: Do autor (2023).

As três calibrações tiveram comportamentos muito semelhantes nas três velocidades de transição, sendo assim será feito uma análise geral dos comportamentos das partículas nas velocidades de transições dos regimes observados por Resende (2017).

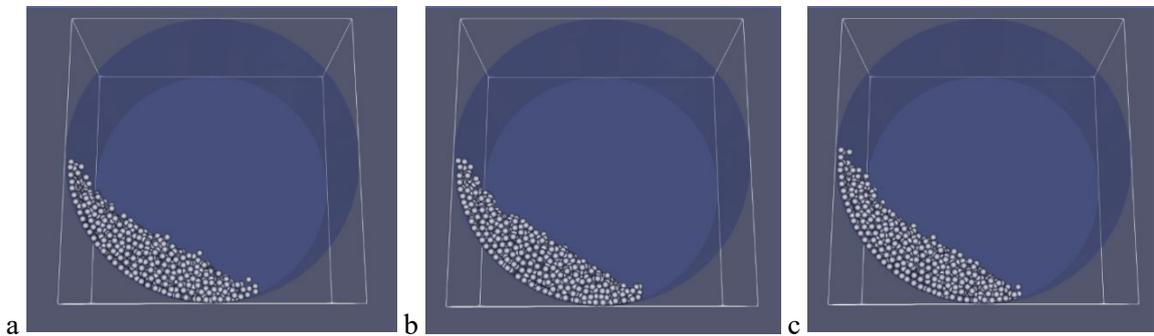
Começando pela velocidade de transição entre os regimes de rolamento e cascadeamento, as calibrações permaneceram no regime de rolamento com uma inclinação um pouco maior do leito. Contudo sem nenhum indício de transição para o regime de cascadeamento.

O mesmo acontece para a segunda velocidade, em que as partículas ainda continuam no regime de rolamento, porém, agora com um pequeno indício de transição para o regime de cascadeamento. Algumas partículas começam a se desprender do leito, no seu topo, formando uma pequena onda, o que é uma característica do regime de cascata. Porém esse comportamento não é muito expressivo e o leito não se encontra no formato de “S”, sendo assim novamente o regime observado foi diferente do constatado por Resende (2017).

Por fim, na terceira velocidade as partículas estão em um regime bem definido de catarateamento, em que as mesmas são projetadas do topo do leito para o espaço e caindo na parte inferior do tambor. O comportamento observado das partículas não se encontra nem perto da transição para o regime de centrifugação parcial, como o observado por Resende (2017) em seu trabalho.

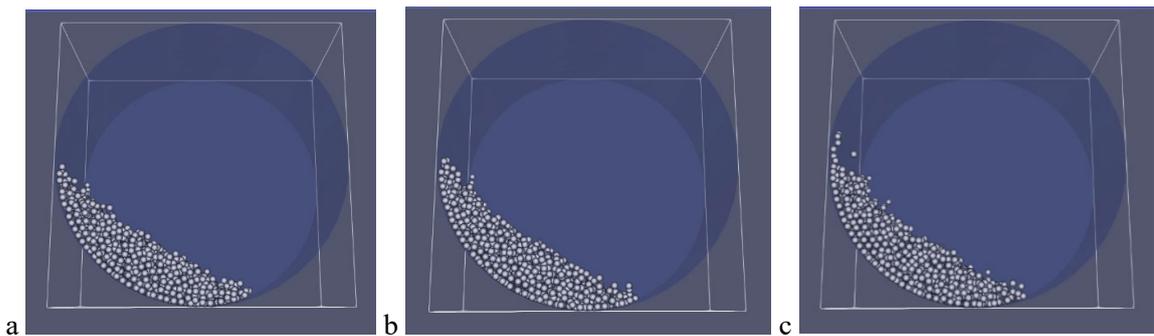
As Figuras 15, 16 e 17 apresentam a captura do último *frame* da simulação dos regimes de transição estudados.

Figura 15 – Simulações 6 (a), 15 (b) e 24 (c) da partícula de uma esfera na velocidade experimental de transição dos regimes rolamento-cascadeamento



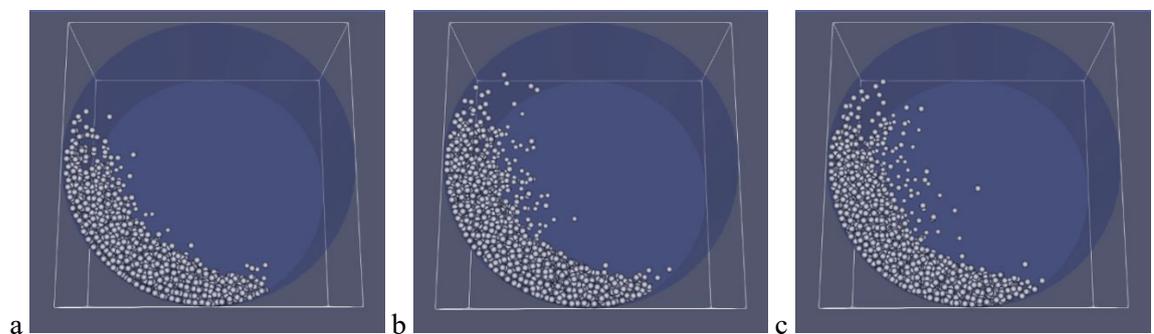
Fonte: Do autor (2023).

Figura 16 – Simulações 6 (a), 15 (b) e 24 (c) da partícula de uma esfera na velocidade experimental de transição dos regimes cascadeamento-catarateamento



Fonte: Do autor (2023).

Figura 17 – Simulações 6 (a), 15 (b) e 24 (c) da partícula de uma esfera na velocidade experimental de transição dos regimes castarateamento-centrifugação



Fonte: Do autor (2023).

Sendo assim, para a partícula representada por uma esfera, a calibração só é efetiva para o regime de rolamento com a melhor combinação de parâmetros apresentada na calibração 24.

### 5.3 Calibração e ângulo de repouso da partícula de duas esferas

Novamente, a primeira resposta avaliada foi o ângulo de repouso dinâmico do material, o qual foi medido em duplicata e os resultados estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 – Ângulo de repouso medido e sua comparação para partícula de duas esferas.

<b>Exp</b>	<b>AE<sub>pp</sub></b>	<b>AE<sub>pw</sub></b>	<b>AR<sub>pp</sub></b>	<b>AR<sub>pw</sub></b>	<b><math>\theta_{s1}</math></b>	<b><math>\theta_{s2}</math></b>	<b>Média <math>\theta_s</math></b>	<b>Erro (%)</b>
1	0,500	0,500	0,010	0,010	32,60	32,60	32,60	12,8%
2	0,500	0,500	0,010	0,030	33,30	32,70	33,00	11,8%
3	0,500	0,500	0,030	0,010	32,20	31,70	31,95	14,6%
4	0,500	0,500	0,030	0,030	33,70	33,50	33,60	10,2%
5	0,500	0,970	0,010	0,010	35,20	34,80	35,00	6,4%
6	0,500	0,970	0,010	0,030	36,20	35,70	35,95	3,9%
7	0,500	0,970	0,030	0,010	36,80	36,80	36,80	1,6%
8	0,500	0,970	0,030	0,030	36,30	37,00	36,65	2,0%
9	0,900	0,500	0,010	0,010	35,90	35,40	35,65	4,7%
10	0,900	0,500	0,010	0,030	34,20	34,10	34,15	8,7%
11	0,900	0,500	0,030	0,010	34,50	34,20	34,35	8,2%
12	0,900	0,500	0,030	0,030	35,70	35,40	35,55	4,9%
13	0,900	0,970	0,010	0,010	36,20	36,00	36,10	3,5%
14	0,900	0,970	0,010	0,030	36,10	36,20	36,15	3,3%
15	0,900	0,970	0,030	0,010	35,20	35,90	35,55	4,9%
16	0,900	0,970	0,030	0,030	35,60	35,80	35,70	4,5%
17	0,403	0,735	0,020	0,020	36,30	36,40	36,35	2,8%
18	0,997	0,735	0,020	0,020	36,70	36,80	36,75	1,7%
19	0,700	0,387	0,020	0,020	-	-	-	-
20	0,700	1,083	0,020	0,020	36,60	35,50	36,05	3,6%
21	0,700	0,735	0,005	0,020	36,10	36,60	36,35	2,8%
22	0,700	0,735	0,035	0,020	36,80	37,00	36,90	1,3%
23	0,700	0,735	0,020	0,005	36,80	36,00	36,40	2,7%
24	0,700	0,735	0,020	0,035	37,10	36,50	36,80	1,6%
25	0,700	0,735	0,020	0,020	37,60	37,50	37,55	-0,4%
26	0,700	0,735	0,020	0,020	37,60	37,50	37,55	-0,4%

Fonte: Do autor (2023).

Ressalta-se que o erro apresentado é resultado da comparação com o valor experimental de Resende (2017) de  $37,4^\circ \pm 0,5^\circ$ , e que a calibração 19 apresentou um comportamento anormal de deslizamento do leito pois o coeficiente de atrito estático partícula-parede estava no valor de extrapolado de  $-\alpha$ , e não foi possível fazer aferição do ângulo de repouso dinâmico.

De acordo com os dados, de uma forma geral, é identificada uma melhora nos resultados dos desvios do ângulo de repouso medido da segunda partícula, com relação as calibrações realizadas para a primeira, no tópico 5.1. Com exceção das calibrações 3 e 19, todos os valores foram abaixo dos 13% de desvio. E, entre essas simulações destacam-se quatro que resultaram em desvios menores que 2%, sendo elas a 7, 22, 24 e 25/26 (que possuem os mesmos parâmetros), as quais têm seus dados ressaltados na Tabela 12 a seguir.

Tabela 12 – Melhores calibrações pelo ângulo de repouso para partícula de duas esferas.

<b>Exp</b>	<b>AE<sub>pp</sub></b>	<b>AE<sub>pw</sub></b>	<b>AR<sub>pp</sub></b>	<b>AR<sub>pw</sub></b>	<b>Média <math>\theta_s</math></b>	<b>Erro (%)</b>
7	0,500	0,970	0,030	0,010	36,80	1,6%
22	0,700	0,735	0,035	0,020	36,90	1,3%
24	0,700	0,735	0,020	0,035	36,80	1,6%
25	0,700	0,735	0,020	0,020	37,55	-0,4%

Fonte: Do autor (2023).

As calibrações 22, 24 e 25 possuem os valores dos coeficientes de atrito estático iguais, tanto para a relação partícula-partícula, quanto para a interação partícula-parede, sendo eles 0,700 e 0,735, respectivamente. Isso mostra uma certa tendência desses valores serem os mais adequados para os parâmetros. Além disso, o coeficiente de atrito de rolamento partícula-partícula das calibrações 24 e 25, também são iguais em um valor de 0,020.

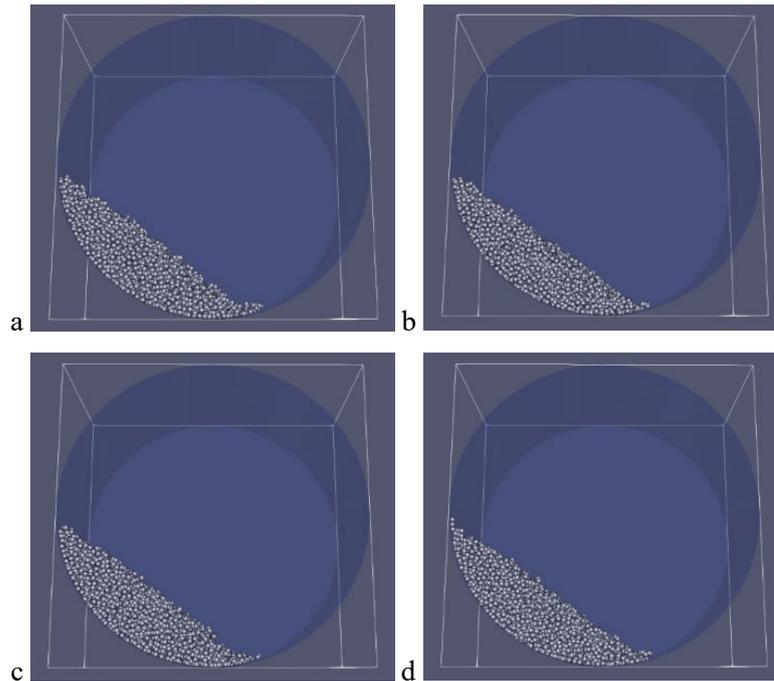
Já a calibração 22 difere no que diz respeito aos dois coeficientes de atrito de rolamento, contudo se comparada à calibração 24, identifica-se que os valores dos parâmetros se repetem alternadamente. Ou seja, o valor da interação partícula-partícula de um é o valor da interação partícula-parede do outro, e vice-versa, com valores de 0,020 e 0,035, o que pode demonstrar uma certa compensação entre os parâmetros.

A calibração que se mostrou com um melhor resultado foi a 25, a qual possui a combinação dos dois valores de coeficiente de rolamento como sendo 0,020. Analisando, apenas esses parâmetros entre as três simulações citadas, o menor valor para os coeficientes trouxe o resultado mais satisfatório.

Por outro lado, a calibração 7 é uma combinação de valores que não se repete em nenhuma das outras simulações citadas. Contudo é possível observar que há uma similaridade

na proporção dos coeficientes de atrito estático com uma certa compensação entre eles, uma vez que a interação partícula-parede tem um valor maior que a interação partícula-partícula, sendo 0,970 e 0,500, respectivamente. Sendo assim, a Figura 18 apresenta o último *frame* das quatro simulações citadas com os melhores resultados de ângulo de repouso.

Figura 18 – Simulações 7 (a), 22 (b), 24 (c) e 25 (d) do PCC de calibração para a partícula de duas esferas



Fonte: Do autor (2023).

Além disso, no Apêndice II do trabalho contém um *QR code*, mostrado na Figura A.28, e um link de um vídeo que apresenta na íntegra uma das simulações realizadas nessa seção, mostrando o escoamento das partículas estudado.

A fim de verificar a aplicabilidade desses parâmetros calibrados para o regime de rolamento em outras condições, as melhores calibrações (7, 22, 24 e 25) foram usadas para avaliar a transição entre os regimes de escoamento no tambor rotativo.

#### 5.4 Transição entre os regimes para a partícula de duas esferas

Sendo assim, as calibrações 7, 22, 24 e 25 foram simuladas novamente, porém o sistema foi colocado nas velocidades angulares de transição entre os regimes, apresentadas na Tabela 6. A partir disso, foi avaliado se as simulações atingiram as transições dos regimes por visualização do comportamento das partículas, e os resultados estão na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultado da transição entre regimes para partícula de duas esferas.

<b>Resende (2017)</b>	<b><math>\omega</math> [rps]</b>	<b>Calibração</b>	<b>Regime observado</b>
Transição rolamento - cascateamento	0,38	6	Rolamento
		22	Rolamento
		24	Rolamento
		25	Rolamento
Transição cascateamento - catarateamento	0,66	6	Cascateamento
		22	Cascateamento
		24	Cascateamento
		25	Cascateamento
Transição catarateamento - centrifugação	1,74	6	Catarateamento
		22	Catarateamento
		24	Catarateamento
		25	Catarateamento

Fonte: Do autor (2023).

As calibrações tiveram comportamentos semelhantes nas três velocidades de transição, sendo assim será feito uma análise geral dos regimes de escoamento das partículas nas supostas velocidades de transições.

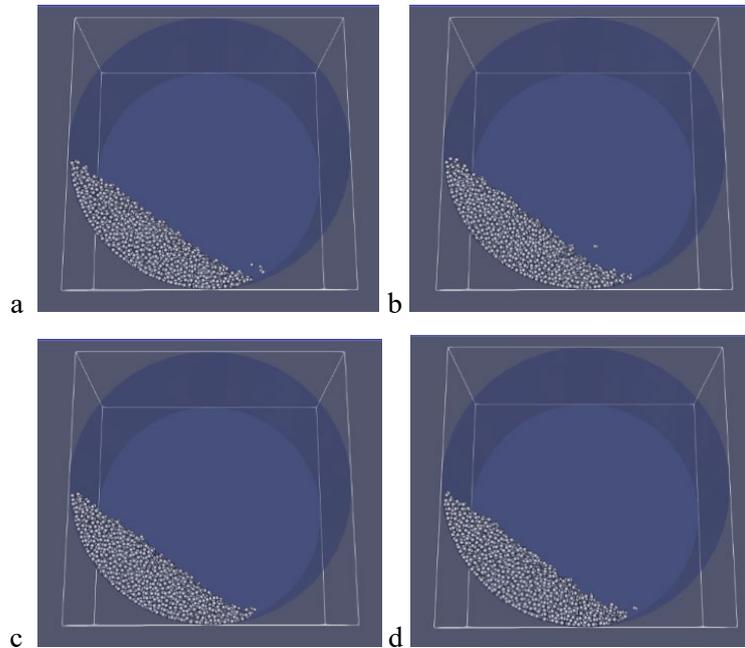
Na primeira velocidade, de transição entre os regimes de rolamento e cascadeamento, as simulações permaneceram no regime de rolamento com uma inclinação um pouco maior do leito, contudo sem nenhum indício de transição para o regime de cascadeamento. O que é um comportamento semelhante ao visualizado para a partícula de uma esfera.

Já na segunda velocidade, em que as partículas deveriam estar em transição de cascadeamento para catarateamento, contudo, elas ainda estão começando a escoar em regime de cascata. Algumas partículas começam a se desprender do topo do leito formando uma pequena onda, o que é uma característica do regime, porém esse comportamento não é muito expressivo e o leito não se encontra no formato de “S”.

Por fim, na terceira velocidade as partículas estão em um regime bem definido de catarateamento, em que as mesmas são projetadas do topo do leito para o espaço e caindo na parte inferior do tambor. Esse comportamento se assemelha ao comportamento da partícula de uma esfera, com uma observação de que neste, as partículas estão sendo lançadas para mais longe, na parte mais inferior do tambor. Mas novamente, esse escoamento das partículas não se encontra nem perto da transição para a centrifugação, que seria o esperado para essa velocidade.

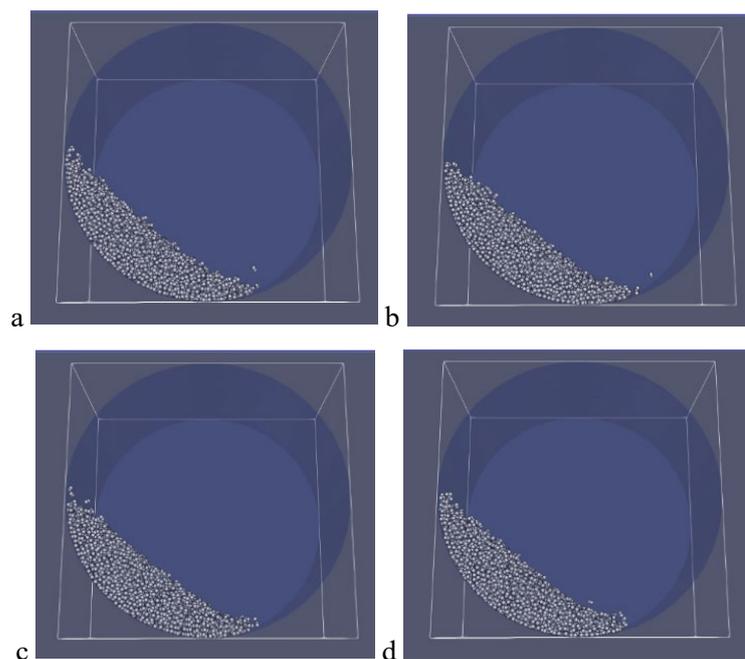
As Figuras 19, 20 e 21 apresentam a captura do último *frame* da simulação dos regimes de transição estudados.

Figura 19 – Simulações 7 (a), 22 (b), 24 (c) e 25 (d) da partícula de duas esferas na velocidade experimental de transição dos regimes rolamento-cascadeamento



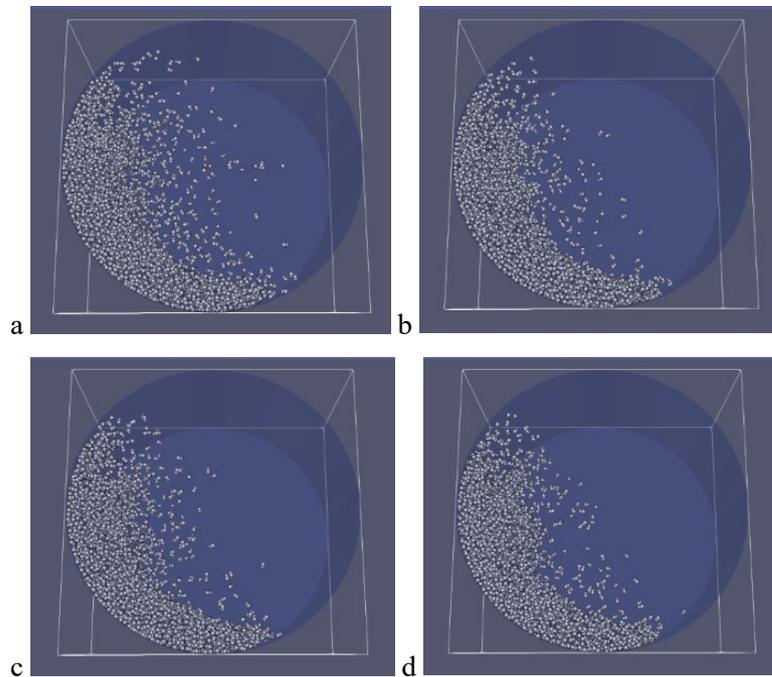
Fonte: Do autor (2023).

Figura 20 – Simulações 7 (a), 22 (b), 24 (c) e 25 (d) da partícula de duas esferas na velocidade experimental de transição dos regimes cascadeamento-catarateamento



Fonte: Do autor (2023).

Figura 21 – Simulações 7 (a), 22 (b), 24 (c) e 25 (d) da partícula de duas esferas na velocidade experimental de transição dos regimes catarateamento-centrifugação



Fonte: Do autor (2023).

Sendo assim, para a partícula representada por duas esferas, a calibração dos parâmetros só é efetiva para o regime de rolamento, no qual foram realizadas as medições do ângulo de repouso que trouxeram resultados satisfatórios. Pela análise da transição de regimes fica evidente que as partículas não atingem o escoamento determinado pela velocidade de rotação experimental relatada por Resende (2017).

Portanto, para a partícula representada pelo *clump* de duas esferas é recomendada a combinação dos parâmetros de coeficientes de atrito os valores da calibração 25, e, apenas para a simulação do regime de rolamento de partícula de café em tambor rotativo, visto que o modelo de transição entre os regimes não foi validado pelo valores de Resende (2017).

### 5.5 Calibração e ângulo de repouso da partícula de três esferas

Novamente, a primeira resposta avaliada foi o ângulo de repouso dinâmico do material, o qual foi medido em duplicata. O ângulo de repouso experimental foi obtido na literatura por Resende (2017) como sendo o valor de  $37,4^\circ \pm 0,5^\circ$ , para as mesmas condições do sistema. Os resultados estão dispostos na Tabela 14, juntamente com o desvio relativo ao valor de referência definido.

Tabela 14 – Ângulo de repouso medido e sua comparação para partícula de três esferas.

<b>Exp</b>	<b>AE<sub>pp</sub></b>	<b>AE<sub>pw</sub></b>	<b>AR<sub>pp</sub></b>	<b>AR<sub>pw</sub></b>	$\theta_{s1}$	$\theta_{s2}$	<b>Média <math>\theta_s</math></b>	<b>Erro (%)</b>
1	0,500	0,500	0,010	0,010	38,80	37,90	38,35	-2,5%
2	0,500	0,500	0,010	0,030	38,20	37,70	37,95	-1,5%
3	0,500	0,500	0,030	0,010	38,10	37,70	37,90	-1,3%
4	0,500	0,500	0,030	0,030	39,00	38,00	38,50	-2,9%
5	0,500	0,970	0,010	0,010	38,30	38,40	38,35	-2,5%
6	0,500	0,970	0,010	0,030	37,90	37,60	37,75	-0,9%
7	0,500	0,970	0,030	0,010	39,30	38,60	38,95	-4,1%
8	0,500	0,970	0,030	0,030	38,60	38,90	38,75	-3,6%
9	0,900	0,500	0,010	0,010	37,80	37,50	37,65	-0,7%
10	0,900	0,500	0,010	0,030	38,20	37,90	38,05	-1,7%
11	0,900	0,500	0,030	0,010	38,50	38,30	38,40	-2,7%
12	0,900	0,500	0,030	0,030	37,90	37,90	37,90	-1,3%
13	0,900	0,970	0,010	0,010	38,00	38,30	38,15	-2,0%
14	0,900	0,970	0,010	0,030	38,20	38,40	38,30	-2,4%
15	0,900	0,970	0,030	0,010	38,70	38,60	38,65	-3,3%
16	0,900	0,970	0,030	0,030	39,00	39,10	39,05	-4,4%
17	0,403	0,735	0,020	0,020	37,50	37,60	37,55	-0,4%
18	0,997	0,735	0,020	0,020	37,90	37,80	37,85	-1,2%
19	0,700	0,387	0,020	0,020	-	-	-	-
20	0,700	1,083	0,020	0,020	38,20	38,00	38,10	-1,9%
21	0,700	0,735	0,005	0,020	37,80	38,10	37,95	-1,5%
22	0,700	0,735	0,035	0,020	38,30	38,00	38,15	-2,0%
23	0,700	0,735	0,020	0,005	38,20	37,60	37,90	-1,3%
24	0,700	0,735	0,020	0,035	38,00	38,10	38,05	-1,7%
25	0,700	0,735	0,020	0,020	38,40	38,20	38,30	-2,4%
26	0,700	0,735	0,020	0,020	38,40	38,20	38,30	-2,4%

Fonte: Do autor (2023).

De acordo com os dados, de uma forma geral, também é identificada uma melhora nos resultados dos desvios do ângulo de repouso medido da terceira partícula, com relação as calibrações realizadas para a primeira e segunda, apresentadas nos tópicos 5.1 e 5.3. Com exceção da calibração 19 (em que o ângulo não foi medido pois o leito estava deslizando devido

ao coeficiente de atrito estático baixo, no valor de  $-\alpha$ ), todos os valores foram abaixo dos 5% de desvio. E, entre essas simulações destacam-se três que resultaram em um desvio menor que 1%, sendo elas a 6, 9 e 17 em que seus valores estão ressaltados na Tabela 15.

Tabela 15 – Melhores calibrações pelo ângulo de repouso para partícula de três esferas.

<b>Exp</b>	<b>AE<sub>pp</sub></b>	<b>AE<sub>pw</sub></b>	<b>AR<sub>pp</sub></b>	<b>AR<sub>pw</sub></b>	<b>Média <math>\theta_s</math></b>	<b>Erro (%)</b>
6	0,500	0,970	0,010	0,030	37,75	-0,9%
9	0,900	0,500	0,010	0,010	37,65	-0,7%
17	0,403	0,735	0,020	0,020	37,55	-0,4%

Fonte: Do autor (2023).

Entre essas três calibrações o único valor que se repete é o coeficiente de atrito de rolamento partícula-partícula ( $AR_{pw}$ ) nas simulações 6 e 9, com um valor de 0,010. Além disso, pode-se identificar uma relação de proporção entre os coeficientes de atrito estático (quando um é baixo, o outro assume um valor mais alto), como acontece para as outras partículas, uma vez que há uma certa compensação entre os valores.

Outra relação interessante observada é que os coeficientes da interação partícula-parede também seguiram uma certa tendência, visto que, na calibração 9 eles são os menores com valores de 0,50 para  $AE_{pw}$  e 0,010 para  $AR_{pw}$ , na calibração 17 eles são medianos, com valores de 0,735 para  $AE_{pw}$  e 0,020 para  $AR_{pw}$ , e por fim na calibração 6 eles atingem os maiores valores, sendo 0,970 para  $AE_{pw}$  e 0,030 para  $AR_{pw}$ .

A calibração que se mostrou com um melhor resultado foi a 17, a qual possui a combinação dos dois valores de coeficiente de rolamento como sendo 0,020, o coeficiente de atrito estático partícula-partícula ( $AE_{pp}$ ) de 0,403 e partícula-parede ( $AE_{pw}$ ) de 0,735. Analisando, apenas esses parâmetros entre as três simulações citadas, os valores intermediários trouxeram o resultado mais satisfatório.

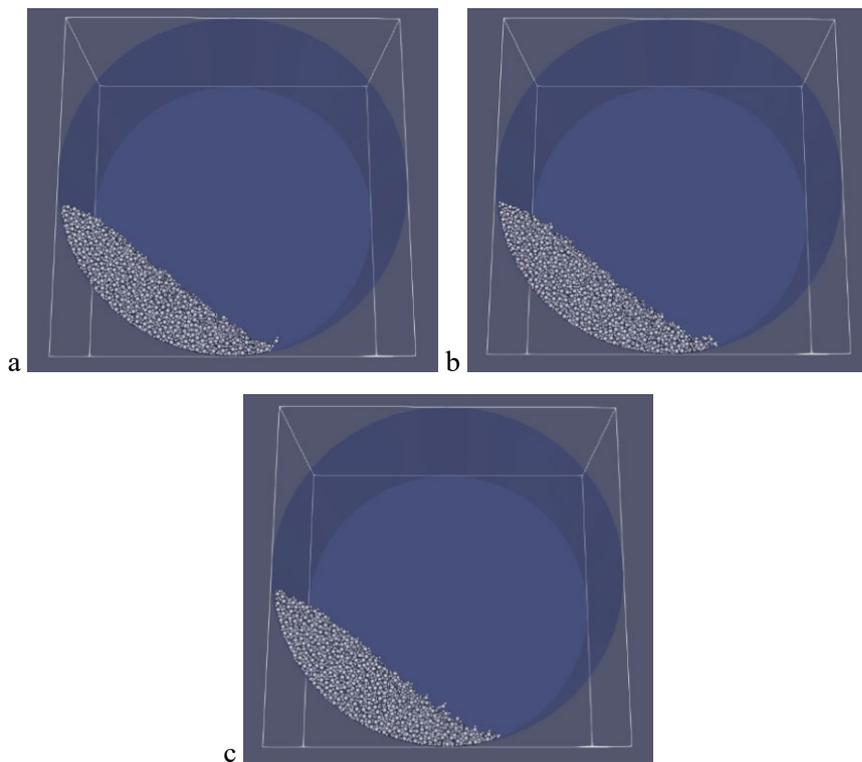
Além disso, os valores dos parâmetros dessa melhor calibração (17) se assemelham muito com os da calibração 25 para a partícula de duas esferas. O único parâmetro que se difere entre essas simulações é o atrito estático partícula-partícula, em que para a representação de três esferas possui um valor menor. Esse resultado mostra que com uma partícula mais irregular, o atrito estático entre as partículas é compensado pela forma, reduzindo seu valor.

Outro dado que reforça essa conclusão é a comparação entre as melhores calibrações, segundo a medida do ângulo de repouso, das partículas de uma e três esferas. A partícula de uma esfera possui uma combinação de valores dos coeficientes bem mais elevadas que a de três

esferas, principalmente no que diz respeito aos atritos de rolamento, com um valor de quase 8 vezes maior para a interação partícula-parede ( $AR_{pw}$ ).

A Figura 22 apresenta o último *frame* das três simulações citadas com os melhores resultados de ângulo de repouso para a partícula de três esferas. Além disso, no Apêndice III do trabalho contém um *QR code*, apresentado na Figura A.29, e um *link* que direcionam para um vídeo que mostra na íntegra uma das simulações realizadas nessa seção.

Figura 22 – Simulações 6 (a), 9 (b) e 17 (c) do PCC de calibração dos parâmetros para a partícula de três esfera



Fonte: Do autor (2023).

A fim de verificar a aplicabilidade desses parâmetros calibrados para o regime de rolamento em outras condições, as melhores calibrações (6, 9 e 17) foram usadas para avaliar a transição entre os regimes de escoamento no tambor rotativo, como apresentado a seguir.

### 5.6 Transição entre os regimes para a partícula de três esferas

Por fim, as calibrações 6, 9 e 17 foram simuladas novamente e o sistema foi colocado nas velocidades angulares de transição entre os regimes, apresentadas na Tabela 6. A partir disso, foi avaliado se as simulações atingiram os regimes relatados por Resende (2017) pela da visualização do comportamento das partículas, e os resultados estão na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultado da transição entre regimes para partícula de três esfera.

<b>Resende (2017)</b>	<b><math>\omega</math> [rps]</b>	<b>Calibração</b>	<b>Regime observado</b>
Transição		6	Transição rolamento-cascadeamento
rolamento -	0,38	9	Transição rolamento-cascadeamento
cascadeamento		17	Transição rolamento-cascadeamento
Transição		6	Transição cascadeamento-catarateamento
cascadeamento -	0,66	9	Cascadeamento
catarateamento		17	Transição cascadeamento-catarateamento
Transição		6	Transição catarateamento-centrifugação
catarateamento -	1,74	9	Catarateamento
centrifugação		17	Transição catarateamento-centrifugação

Fonte: Do autor (2023).

De acordo com os resultados, as calibrações 6 e 17 tiveram comportamentos semelhantes nas três velocidades de transição, já a calibração 9 só se comportou de maneira semelhante na primeira transição entre regimes.

Na primeira velocidade, de transição entre os regimes de rolamento e cascadeamento, as três simulações estavam em um escoamento semelhante. Todas elas estavam na transição entre os regimes, como era o esperado, o que é caracterizado pelo início da formação do escoamento em “S”, não muito expressivo, mas já presente. Sendo assim, as três calibrações representam o processo tanto no regime de rolamento quanto no cascadeamento, o que já é um resultado satisfatório para simulações que envolvem secagem, pois esses são os regimes de interesse.

Adiante, na segunda velocidade, em que as partículas deveriam estar em transição de cascadeamento para catarateamento, apenas a calibração 9 não a atingiu. Identificou-se que as simulações 9 e 17 estão com o escoamento característico de cascadeamento, com o leito bem definido em formato de “S”, sendo que a 17 começa a ter suas partículas levemente lançadas no topo do leito formando uma pequena onda, o que pode ser considerado um indício de transição para o regime de catarateamento. Na calibração 6 essa onda no topo do leito é um pouco maior, contudo, as partículas ainda não são lançadas com força suficiente para atingir a parte inferior do leito. Portanto o regime de catarateamento não é atingido, entretanto, também já é possível considerar que o escoamento está evoluindo para tal.

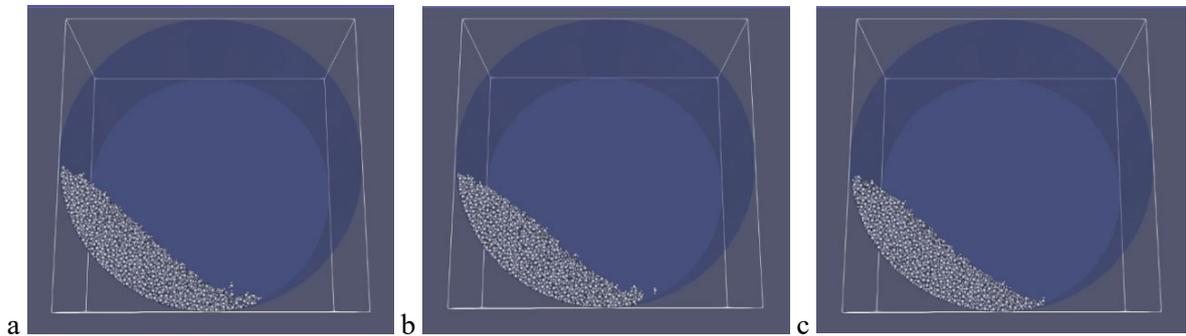
Por fim, na terceira velocidade, as partículas das três esferas estão em um regime bem definido de catarateamento partindo para o de centrifugação, em que as mesmas são projetadas para o espaço do tambor. A calibração 6 tem sua camada mais externa de partículas quase toda

em centrifugação completa, sendo que apenas o final da camada não completa o movimento. O que também é observado para a simulação 17, em que as partículas se desprendem da parede um pouco antes de completar o movimento. Já a outra simulação, a camada mais externa de partículas não chega perto de completar o movimento e as partículas se desprendem da parede do equipamento, antes mesmo de atingirem o topo caindo para a parte inferior.

Contudo, por se tratar de uma velocidade de transição entre os regimes é possível concluir que as simulações 6 e 17, representam bem os dados experimentais. E de acordo com a literatura, a centrifugação pode ser considerada iniciada quando a camada mais externa de partícula se adere completamente à parede do equipamento.

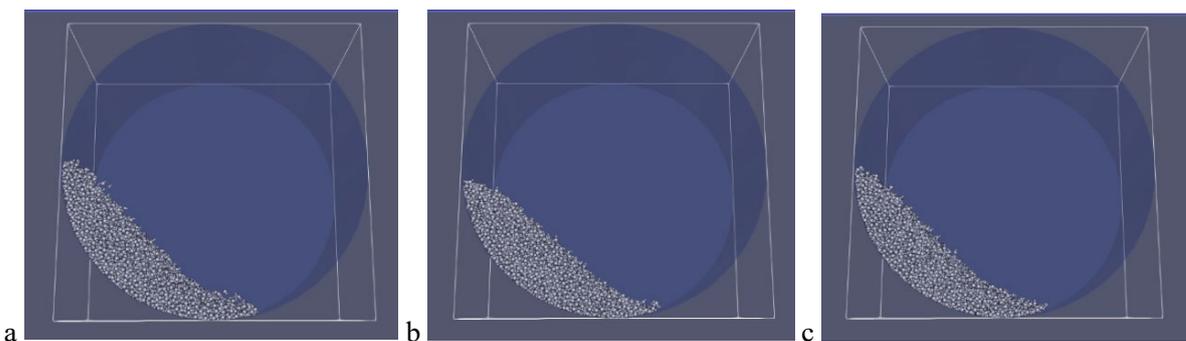
As Figuras 23, 24 e 25 apresentam os últimos *frames* das simulações de transição dos regimes. Além disso, no Apêndice IV do trabalho contém um *QR code*, apresentado pela Figura A.30., e um *link* que direcionam para um vídeo que apresenta na íntegra uma das simulações realizadas nessa seção, mostrando a transição de regimes e o escoamento das partículas.

Figura 23 – Simulações 6 (a), 9 (b) e 17 (c) da partícula de três esferas na velocidade experimental de transição dos regimes rolamento-cascadeamento



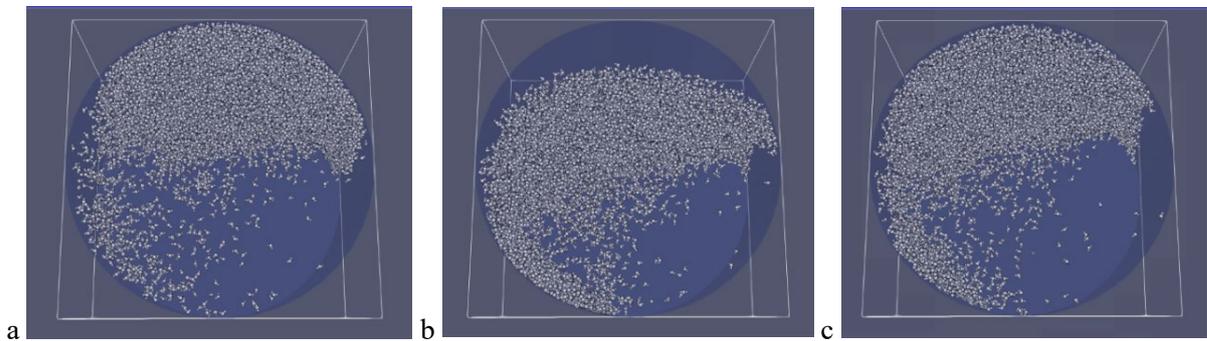
Fonte: Do autor (2023).

Figura 24 – Simulações 6 (a), 9 (b) e 17 (c) da partícula de três esferas na velocidade experimental de transição dos regimes cascadeamento-catarateamento



Fonte: Do autor (2023).

Figura 25 – Simulações 6 (a), 9 (b) e 17 (c) da partícula de três esferas na velocidade experimental de transição dos regimes catarateamento-centrifugação



Fonte: Do autor (2023).

Sendo assim, para a partícula representada por três esferas, as três calibrações dos parâmetros é efetiva não só no regime de rolamento, no qual foram realizadas as medições do ângulo de repouso que trouxeram resultados satisfatórios, como também para o regime de cascadeamento.

Esses dois regimes de escoamento em tambor rotativo são os mais indicados para os processos de secagem nesses equipamentos, e de acordo com o resultado do ângulo de repouso a calibração mais adequada é a 17. Além disso, como também foram avaliadas os outros dois regimes de escoamento seguintes, cabe ressaltar que essa calibração continua sendo a mais adequada para a representação dos processos.

Sendo assim, seus parâmetros conseguem representar com efetividade todos os regimes de escoamento em tambor rotativo, portanto, todos os dados experimentais foram validados seguindo essa combinação de valores para os parâmetros de coeficientes de atrito, que são 0,403 para  $AE_{pp}$ , 0,735  $AE_{pw}$ , 0,020 para  $AR_{pp}$  e  $AR_{pw}$ .

### 5.7 Custo computacional

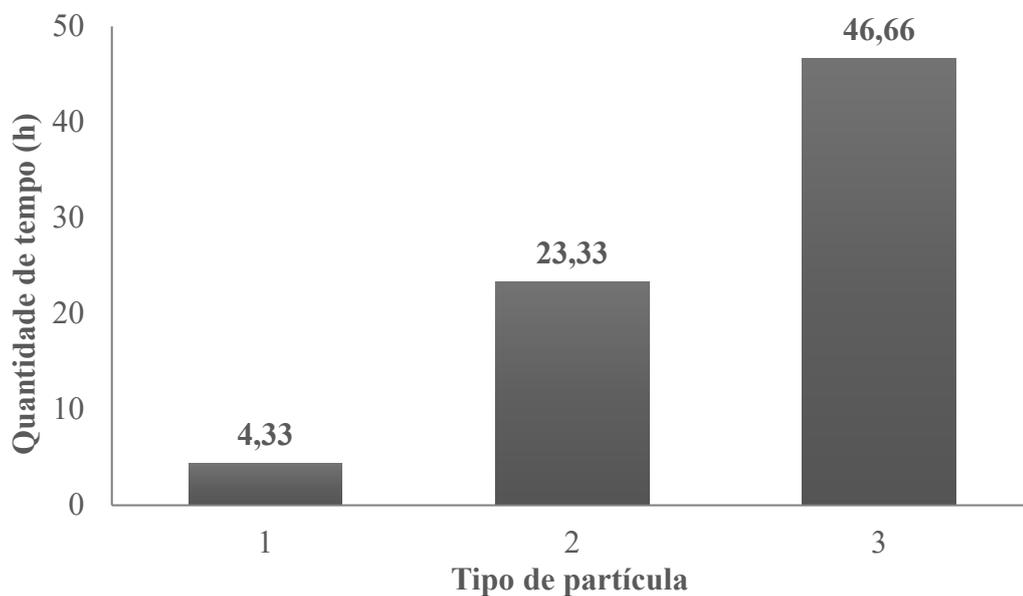
Além dos resultados das simulações, o gráfico apresentado na Figura 26 mostra o tempo total gasto na calibração de cada uma das partículas. Esses valores estão associados ao custo computacional das simulações, de acordo com o tipo de partícula utilizado para a representação do café. O tipo 1 é a partícula de uma esfera, o tipo 2 se refere à partícula de duas esferas e o tipo 3 representa o *chump* de partícula formado por três esferas.

Para esse tipo de avaliação é preciso definir algumas características de *hardware* e *software* do computador. O CPU do equipamento é constituído de um processador Intel®

Core™ i5-7500 CPU @ 3.40 GHz x4 e memória de 8 GB. Seu sistema operacional é o Linux na versão Ubuntu 16.04 LTS.

Além disso, ressalta-se que foram comparados apenas os tempos de simulação da primeira parte da calibração, que foi a execução dos PCC's, ou seja, foram consideradas as 26 simulações de cada planejamento. Outro detalhe foi que os fóruns de debates do *software Liggths*® recomendam colocar apenas um processador para executar os cálculos afim de minimizar erros devido a utilização de *clumps*, e, assim foi feito para todas as três partículas.

Figura 26 – Gráfico de custo computacional para simulação



Fonte: Do autor (2023).

De acordo com a Figura 26, é evidente que quanto mais esferas envolvidas na confecção do *clump* para a representação da partícula de café, mais tempo será necessário de simulação.

Apesar de o custo computacional com uma única esfera ser bem mais baixo, os resultados só seriam representativos no regime de rolamento, e com certa moderação, visto que os coeficientes de atritos de rolamento estão bem superiores, e o modelo apresentado não descreve bem o comportamento das partículas.

Já o *clump* de três esferas é o que possui o custo computacional mais elevado, contudo é o que melhor representa o comportamento das partículas, não só no regime de rolamento, mas também nas transições entre os regimes seguintes.

Portanto a relação custo-benefício tende a ser maior para a partícula de três esferas, uma vez que apesar de tem um custo computacional maior, ela já consegue representar bem o processo, trazendo resultados mais assertivos para os estudos envolvendo o escoamento de café.

## 6 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados foi possível avaliar através de simulações computacionais pela metodologia dos elementos discretos o comportamento das partículas de café representadas por 3 formas diferentes alterando o número de esferas envolvidas na construção do *clump* no software *Liggghts*®.

Sendo assim, ficou evidente que a partículas mais simples, de uma esfera, representou um comportamento razoável com um custo computacional bem pequeno, com resultados próximos do experimental para o ângulo de repouso, característico do regime de rolamento, em que os parâmetros adequados são os da simulação 25. Entretanto, para os outros regimes de escoamento em tambor rotativo esse tipo de partícula não é adequado, visto que não foi possível atingir a transição entre eles, utilizando os dados experimentais de Resende (2017).

Já o *clump* de duas esferas apresentou resultados melhores que a anterior, para o ângulo de repouso do regime de rolamento, porém com um custo computacional um pouco maior, sendo os parâmetros da simulação 25 os mais adequados. Contudo, essa partícula também não é adequada para o processo pois as transições entre os regimes de escoamento não foram atingidas.

Por fim, com um custo computacional mais elevado, a partícula representada pelo *clump* de três esferas foi a que apresentou os melhores resultados. Com um desvio de 0,4% do valor de ângulo de repouso experimental de Resende (2017) a simulação 17 apresenta a combinação dos parâmetros de coeficiente de atrito indicada para os processos. Além de adequado para o regime de rolamento, essa simulação representou de forma efetiva todas as transições entre regimes de escoamento relatadas por Resende (2017).

Portanto, entre os três tipos de partículas estudados, o mais recomendado para representar o comportamento real da partícula de café é o *clump* formado por três esferas, com os coeficientes de atrito calibrados nos valores de 0,403 para  $AE_{pp}$ , 0,735 para  $AE_{pw}$ , 0,020 para  $AR_{pp}$  e 0,020 para  $AR_{pw}$ .

## 7 REFERÊNCIAS

- 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.
- ANGELONI, G., GUERRINI, L., MASELLA, P., BELLUMORI, M., DALUIO, S., PARENTI, A., INNOCENTI, M. **What kind of coffee do you drink? An investigation on effects of eight different extraction methods.** Food Research International, v.116, p.1327-1335, 2019.
- 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.
- BIAN, X; WANG, G.; WANG, H.; WANG, S.; WEIDONG, L. Effect of lifters and mill speed on particle behavior, torque and power consumption of a tumbling ball mill: Experimental study and Dem simulation. Minerals Engineering, v. 105, p. 22-35, 2017.
- BORÉM, F. M.; CORADI, P.C.; SAATH, R.; OLIVEIRA, J.A. Qualidade do café natural e despulpado após secagem em terreiro e com altas temperaturas. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1609-1615, 2008.
- BRANDÃO, R. J. **Estudo da segregação de material granular em tambor rotatório empregando a abordagem numérica lagrangeana.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 107 p., 2017.
- BRANDÃO, R. J.. **Investigação numérica e experimental do escoamento granular e dos fenômenos de segregação radial e axial em tambor rotatório.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 122p., 2019.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and Storage Of Grains and Oilseeds.** Springer US, 1992. 450 p.
- CHADWICK, P. C.; BRIDGWATER, J. **Solids flow in dish granulators.** Chemical Engineering Science, v. 52, n. 15, p. 2497-2509, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S00092509\(97\)000687](https://doi.org/10.1016/S00092509(97)000687)
- 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.
- CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de café, v.10, safra 2023, Primeiro levantamento de janeiro 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe> , Acessado em: 12/04/23.
- CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. **A discrete numerical model for granular assemblies.** Géotechnique. v. 29, n. 1, p. 47-65, 1979. Disponível em: <<https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>>
- ESQUIVEL, P., Jiménez, V.M. **Functional properties of coffee and coffee by-products.** Food Research International, v.46, p.488-495, 2012.

- FANTOZZI, F.; COLANTONI, S.; BARTOCCI, P.; DESIDERI, U. **Rotary kiln slow pyrolysis for syngas and char production from biomass and waste - Part I: Working envelope of the reactor**. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, v. 129, n. 4, p. 901-907, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.2720521>
- FERGUSON, B. G., CHARLTON, A. J., CHAMBERS, E., & STANLEY, R. A. **Improving the sustainability of coffee production: incorporating stakeholder feedback into research priorities**. Sustainability, p 1357, 2019.
- GEERAERT, L., BERECHA, G., HONNAY, O., AERTS, R. **Organoleptic quality of Ethiopian Arabica coffee deteriorates with increasing intensity of coffee forest management**. Journal of Environmental Management, v.231, p.282-288, 2019.
- 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.
- ILLY, A.; VIANI, R. **Espresso coffee: the chemistry of quality**. London: Academic, 1995. 253 p.
- 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.
- KNOPP, S. E.; BYTOF, G.; SELMAR, D. **Influence of processing on the cont of sugars in green arabica coffee beans**. European Food Research and Technology, v. 223, n. 2, p. 195-201, June 2006.
- KUMAR, R; FREIREICH, B.; WASSGREN, C. DEM-compartment-population balance model for particle coating in a horizontal rotating drum. Chemical Engineering Science, v. 125, p.144-157, 2015.
- LI, D.; LIU, G.; LU, H.; ZHANG, Q.; WANG, Q.; YU, H. **Numerical simulation of different flow regimes in a horizontal rotating ellipsoidal drum**. Powder Technology, v. 291, p. 86–96, 2016.
- LIU, X. Y.; SPECHTA, E.; MELLMANN, J. **Experimental study of the lower and upper angles of repose of granular materials in rotating drums**. Powder Technology, vol. 154, p. 125-131, 2005.
- 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.
- LIMA, R. M. **Estudo da dinâmica de partículas em tambores rotatórios empregando a abordagem numérica**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia Minas Gerais, 98 p., 2017.
- MACHADO, M.V.C. Estudo experimental e numérico da dinâmica de corpos moedores em moinhos de bola. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 99 p., 2016.
- MATIELLO, J.B.; SANTINATO, R.; ALMEIDA, S.R.; GARCIA, A.W.R. **Cultura do café no Brasil**. Varginha: Futurama Editora, 2016.

- MATUTTIS, H. G.; CHEN, J. **Understanding the discrete element method**. Singapore: Wiley, 2014.
- MARIGO, M; STITT, E. H.. Discret element method (DEM) for industrial applications: Comments on calibration and validation for the modelling of cylindrical pellets. *KONA Powder and Particle Journal*, v. 32, n 32, 2015.
- MELLMANN, J.. **The transverse motion of solids in rotating cylinders—forms of motion and transition behavior**. *Powder Technology*, v. 118, p. 251-270, 2001.
- NASCIMENTO, S.M. Estudo experimental e de simulação da dinâmica de material particulado em tambor rotatório com suspensores. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 107p., 2014.
- ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ. Relatório sobre o mercado de café – dezembro 2022. Disponível em: <http://www.ico.org/pt/Market-Report-22-23-p.asp> , Acessado em: 12/04/22.
- PATANKAR, S. V.. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- PIMENTA, C.J. **Qualidade de café**. Lavras: UFLA, 2003.
- RISTOW, G.H. **Flow properties of granular materials in three-dimensional geometries**. Habilitationsschrift, Philipps-Universität Marburg, p. 63-92, 1998.
- 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.
- RESENDE, I. J.. **Estudo experimental e numérico da dinâmica de grãos de café em um tambor rotatório**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 93 p., 2017.
- 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.
- SANTOS, D.A. **Estudo experimental e numérico da dinâmica de partículas em um tambor rotatório**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 147p., 2015.
- SHAMSI, M. M. M.; MIRGHASEMI, A. A.. **Numerical simulation of 3D semi-real-shaped granular particle assembly**. *Powder Technology*, vol. 221, p. 431-446, 2012.
- SILVÉRIO, B. C. **Estudos fluidodinâmicos e de secagem de fertilizantes em diferentes tipos de secadores roto-aerados**. Dissertação de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 164 p., 2012.
- THORNTON, C. **Granular dynamics, contact mechanics and particle system simulations: DEM study**. Springer, v. 24, 2015.
- VIEIRA, L.G.M. Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes, 297 p., Dissertação de Doutorado, UFU, Minas Gerais, 2006.

VIEIRA, R. C. M. T.; TEIXEIRA FILHO, A. R.; OLIVEIRA, A. J.; LOPES, M. R. (Orgs.). Cadeias produtivas no Brasil: análise da competitividade. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Comunicação para Transferência de Tecnologia, 2001. 468p.

WATANABE, H.. **Critical rotation speed for ball-milling**. Powder Technology, v. 104, 1999.

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.

XIAO, X; TAN, Y.; ZHANG, H; DENG, R; JIANG, S. Experimental and Dem studies on the particle mixing performance in rotating drums: Effect of area ratio. Powder Technology, v.314, p. 182-194, 2017.

ZAMBOLIM, LAÉRCIO. **Aspectos Críticos no estudo da floração do café**. In: ZAMBOLIM, Laércio. Efeitos da irrigação sobre a qualidade e produtividade do café. Viçosa: UFV, 2004.

## 8 APÊNDICES

Nessa seção estão os apêndices referenciados no trabalho.

### 8.1 Apêndice I

A Figura A.1 é o *QR code* referente ao link, que está a seguir, de um vídeo que representa a calibração dos coeficientes de atrito da partícula de café representada por uma esfera.

Figura A.27 – Link para o vídeo que ilustra o movimento das partículas usando os parâmetros de calibração para a partícula de café representada por uma esfera



Fonte: <https://youtu.be/prknWBQ8XD8>, do autor.

### 8.2 Apêndice II

A Figura A.2 é o *QR code* referente ao link, que está a seguir, de um vídeo que representa a calibração dos coeficientes de atrito da partícula de café representada por duas esferas.

Figura A.28 – Link para o vídeo que ilustra o movimento das partículas usando os parâmetros de calibração para a partícula de café representada por duas esferas



Fonte: <https://youtu.be/RUFY1vYfQZg>, do autor.

### 8.3 Apêndice III

A Figura A.3 é o *QR code* referente ao link, que está a seguir, de um vídeo que representa a calibração dos coeficientes de atrito da partícula de café representada por três esferas.

Figura A.29 – Link para o vídeo que ilustra o movimento das partículas usando os parâmetros de calibração para a partícula de café representada por três esferas

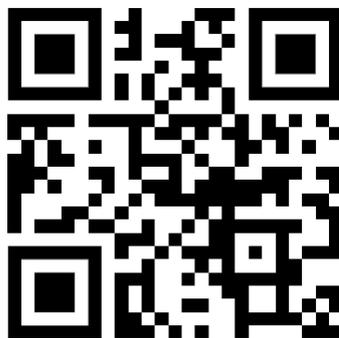


Fonte: <https://youtu.be/bzTuJK2r-U4> , do autor.

### 8.4 Apêndice IV

A Figura A.4 é o *QR code* referente ao link, que está a seguir, de um vídeo que representa as transições entre os regimes de escoamento em tambor rotativo da partícula de café representada por três esferas.

Figura A.30 – Link para o vídeo que ilustra as transições entre os regimes de escoamento para a partícula de café representada por três esferas



Fonte: <https://youtu.be/g1rrduYJ2w4> , do autor.