



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



Estudo experimental e numérico da dinâmica de partículas em um disco rotatório

Rondinelli Moulin Lima

Uberlândia – MG

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



Estudo experimental e numérico da dinâmica de partículas em um disco rotatório

Rondinelli Moulin Lima

Orientadores:

Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte

Prof. Dr. Marcos A. de Souza Barrozo

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

Uberlândia – MG

2021

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

L732 Lima, Rondinelli Moulin, 1991-
2021 Estudo experimental e numérico da dinâmica de
partículas em um disco rotatório [recurso eletrônico] /
Rondinelli Moulin Lima. - 2021.

Orientador: Claudio Roberto Duarte.
Coorientador: Marcos Antonio de Souza Barrozo.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Química.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2021.418>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia química. I. Duarte, Claudio Roberto,
1975-, (Orient.). II. Barrozo, Marcos Antonio de Souza,
1961-, (Coorient.). III. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Química. IV.
Título.

CDU: 66.0

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Sala 206 - Bairro Santa Mônica,
Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34)3239-4249 - www.pppgeq.feq.ufu.br - secppgeq@feq.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Química			
Defesa de:	Tese de Doutorado, 03/2021, PPGEQ			
Data:	30 de julho de 2021	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento: 11:54
Matrícula do Discente:	11723EQU007			
Nome do Discente:	Rondinelli Moulin Lima			
Título do Trabalho:	Estudo experimental e numérico da dinâmica de partículas em um disco rotatório			
Área de concentração:	Desenvolvimento de processos químicos			
Linha de pesquisa:	Processos de Separação			
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Estudo experimental e numérico da dinâmica de partículas em um tambor rotatório			

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Robson Costa de Sousa - CCAE/UFES; Irineu Petri Júnior - DEG/UFLA; Ricardo Amâncio Malagoni - FEQUI/UFU; Ubirajara Coutinho Filho - PPGEQ/UFU; Claudio Roberto Duarte - PPGEQ/UFU, orientador e Marcos Antonio de Souza Barrozo - PPGEQ/UFU, orientador do candidato.

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

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

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



Documento assinado eletronicamente por **Ubirajara Coutinho Filho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/07/2021, às 11:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Antonio de Souza Barrozo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/07/2021, às 11:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Claudio Roberto Duarte, Presidente**, em 30/07/2021, às 11:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Amâncio Malagoni, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/07/2021, às 11:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Robson Costa de Sousa, Usuário Externo**, em 30/07/2021, às 11:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Irineu Petri Júnior, Usuário Externo**, em 30/07/2021, às 12:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2941868** e o código CRC **023C611F**.

Dedico aos meus pais, Tarcísio e Nilcéia

Agradecimentos

A Deus, por todas as maravilhas que tem realizado em minha vida e pelo amparo nos momentos difíceis, por sempre ter me escutado e me ajudado.

A minha eterna gratidão, aos meus pais Tarcísio Lima e Nilcéia Moulin Breda Lima, ao meu irmão Tarcísio Lima Filho, que mesmo na distância e nas dificuldades, sempre me amaram e me apoiaram, não medindo esforços para que nada me faltasse.

Aos meus orientadores Claudio Roberto Duarte e Marcos Antonio de Souza Barrozo, por todo auxílio e dedicação para a execução deste trabalho. Agradeço imensamente por compartilharem seus conhecimentos comigo, me ajudando, tanto pessoalmente quanto profissionalmente, a ser uma pessoa melhor.

Agradeço aos meus companheiros de república, Grégori, Matheus, Robert e Rodolfo, que me acompanharam ao longo de toda essa jornada.

Agradeço aos companheiros de laboratório, Angélica, Gabriela, Geraldo, Gisele, Gláucia, Grazille, Janaína, Jeniffer, Larissa, Lidja, Marcela, Marcus, Murilo, Natália, Priscila, Raíssa, Raphael, Suellen e Thaís pela amizade e pelos momentos de risada e de descontração, tornando as estadias no laboratório muito mais prazerosas. Agradeço em especial ao Argileu, um grande amigo, que infelizmente não está mais conosco.

Aos alunos de iniciação científica, Igor e Fernanda que em diversos momentos me auxiliaram neste trabalho.

À Faculdade de Engenharia Química (FEQUI) da Universidade Federal de Uberlândia, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelos recursos oferecidos para a realização desse trabalho. Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão desse trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	v
LISTA DE SÍMBOLOS	vii
RESUMO.....	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivos específicos	3
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Disco Rotatório	5
2.1.1. Modificações no disco rotatório.....	6
2.1.2. Comparação entre disco rotatório e tambor rotatório	7
2.1.3. Regimes de escoamento	8
2.2. Método dos Elementos Discretos (MED)	13
2.2.1. Passo no tempo.....	17
2.2.2. Parâmetros numéricos MED	18
2.3. Rede Neural	25
2.3.1. Métricas para avaliação do desempenho de uma CNN.....	28
CAPÍTULO 3 MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1. Caracterização dos materiais	31
3.2. Unidade experimental: Disco rotatório	37
3.3. Determinação do <i>holdup</i> dos sólidos no disco rotatório	38
3.4. Determinação dos regimes de escoamento	38
3.4.1. Análise por imagens	38
3.4.2. Análise por acústica	40

3.5. Determinação do ângulo de partida	41
3.6. Análise da velocidade das partículas na superfície do leito granular	41
3.7. Simulações utilizando o Métodos dos Elementos Discretos (MED).....	42
3.7.1. Análise de sensibilidade dos parâmetros numéricos MED.....	43
3.7.2. Análise da influência das condições operacionais do disco rotatório.....	44
3.7.3. Simulação dos regimes de escoamento.....	44
3.7.4. Análise das camadas ativas e passivas no regime de rolamento	45
CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1. Caracterização dos materiais	46
4.2. Determinação <i>holdup</i> dos sólidos no disco rotatório	48
4.3. Determinação dos regimes de escoamento por análise de imagens	50
4.4. Determinação dos regimes de escoamento por análise acústica	57
4.5. Determinação do ângulo de partida.....	60
4.6. Determinação da velocidade das partículas na superfície do leito granular.....	62
4.7. Simulações numéricas utilizando o Método dos Elementos Discretos (MED)....	64
4.7.1. Análise de sensibilidade dos parâmetros numéricos MED.....	64
4.7.2. Análise da influência das condições operacionais do disco rotatório no número de contato partícula-partícula.....	67
4.7.3. Simulação dos regimes de escoamento.....	68
4.7.4. Análise das camadas ativas e passivas no regime de rolamento	84
CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES	88
5.1. Conclusão	88
5.1.1. Estudos experimentais	88
5.1.2. Estudos numéricos	90
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

APÊNDICE A	105
APÊNDICE B.....	109
APÊNDICE C	113
APÊNDICE D	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama esquemático do disco rotatório (CHADWICK; ROUGH; BRIDGWATER, 2005)	5
Figura 2.2: Diferentes configurações do disco rotatório: (a) disco com paredes laterais em degraus; (b) disco com as paredes laterais em cone e (c) disco com alimentação central (CAPES, 1980).....	6
Figura 2.3: Diagrama esquemático de um tambor rotatório (Adaptado de FAYED e OTTEN, 1997).....	7
Figura 2.4: Regimes de escoamento em um disco rotatório (MELLMANN, 2001).	8
Figura 2.5: Representação das regiões ativa e passiva no regime de rolamento.	9
Figura 2.6: Representação dos tipos de centrifugação em um tambor rotatório: a) somente a camada mais externa das partículas; b) aderidas todas as partículas aderidas.	11
Figura 2.7: Fluxograma empregado nas simulações MED (Adaptado de SULLIVAN, 2011).	14
Figura 2.8: Esquema representativo do deslocamento da onda de Rayleigh (Adaptado de HASSANPOUR e PASHA, 2016)	18
Figura 2.9: Esquema para medição do coeficiente de restituição entre duas partículas, utilizando a metodologia do pêndulo (HLOSTA et al., 2018).	20
Figura 2.10: Diagrama de forças aplicado em um corpo livre.	22
Figura 2.11: Diagrama de forças das metodologias utilizadas para a determinação do coeficiente de atrito estático: a) plano horizontal; b) plano inclinado.	23
Figura 2.12: Balanço de forças realizado durante o movimento de rolamento.	24
Figura 2.13: Rede neural com três camadas.	25
Figura 2.14: Exemplo de arquitetura de uma CNN (VARGAS; CARVALHO; VASCONCELOS, 2016).....	26
Figura 2.15: Operação de convolução (KHAN et al., 2018).	26
Figura 2.16: Pooling máximo e pooling médio (KHAN et al., 2018).	27

Figura 3.1: Materiais particulados: a) soja e b) esfera de vidro.	31
Figura 3.2: Determinação do ângulo de repouso: (a) Aparato experimental utilizado, (b) formação da pilha de partículas e (c) posição das partículas extraídas pelo software Tracker.	33
Figura 3.3: Tambor rotatório utilizado para medição do ângulo de repouso dinâmico.....	34
Figura 3.4: Aparato experimental para determinação do coeficiente de atrito estático.	34
Figura 3.5: Dispositivo de soltura utilizado na medição do coeficiente de atrito de rolamento.	35
Figura 3.6: Base de apoio utilizada na medição do coeficiente de atrito de rolamento.	36
Figura 3.7: Unidade experimental do disco rotatório.	37
Figura 3.8: Inclinômetro digital.....	37
Figura 3.9: Tacômetro digital	37
Figura 3.10: Os diferentes regimes de escoamento granular investigados neste trabalho (Adaptado de SANTOS et al.).....	39
Figura 3.11: Análise da acústica dos regimes de escoamento. (a) microfone condensador DBX RTA, (b) interface de áudio U-Phoria UM2 e (c) disposições dos equipamentos no experimento.	40
Figura 3.12: Esquema de medição do ângulo de partida.	41
Figura 3.13: Esquema demonstrativo utilizado para a determinação das velocidades das partículas no leito granular (Adaptado de SANTOS et al., 2015).	42
Figura 3.14: Representação das camadas ativas e passivas na simulação MED.	45
Figura 4.1: Ângulo de repouso dinâmico: (a) partícula de soja e (b) esfera de vidro.	47
Figura 4.2: Comportamento do holdup dos sólidos para diferentes ângulos de inclinação e velocidades de rotação: (a) partículas de soja e (b) esferas de vidro.....	48
Figura 4.3: Representação dos efeitos do ângulo de inclinação (a) e da velocidade de rotação (b) no holdup dos sólidos do disco rotatório.	49
Figura 4.4: Influência das condições operacionais nos regimes de escoamento das partículas de soja.....	51

Figura 4.5: Influência das condições operacionais nos regimes de escoamento das esferas de vidro.....	52
Figura 4.6: Comparativo da velocidade crítica de centrifugação encontrada experimentalmente com a correlação proposta (Equação 4.3) e com o modelo de Papadakis e Blombled (1961).	55
Figura 4.7: Valores da raiz quadrada média (RQM) da amplitude das partículas de soja em função da velocidade de rotação: a) 2%, b) 5% e c) 8%.	58
Figura 4.8: Valores da raiz quadrada média (RQM) da amplitude das esferas de vidro em função da velocidade de rotação: a) 2%, b) 5% e c) 8%.	58
Figura 4.9: Determinação do ângulo de saída para o grau de preenchimento de 2, 5 e 8% sob diferentes condições de operação.	61
Figura 4.10: Velocidade das partículas de soja para o ângulo de inclinação de 60°: a) grau de preenchimento 2% e b) grau de preenchimento 5%.	63
Figura 4.11: Velocidade das esferas de vidro para o ângulo de inclinação de 60°: a) grau de preenchimento 2% e b) grau de preenchimento 5%.	64
Figura 4.12: Fluxograma utilizado no processo de calibração.	70
Figura 4.13: Análise qualitativa dos regimes de escoamento das esferas de vidro, numérico e experimental, para o ângulo de inclinação de 40°.....	72
Figura 4.14: Análise qualitativa dos regimes de escoamento das esferas de vidro, numérico e experimental, para o ângulo de inclinação de 50°.....	73
Figura 4.15: Análise qualitativa dos regimes de escoamento das esferas de vidro, numérico e experimental, para o ângulo de inclinação de 60°.....	74
Figura 4.16: Comparativo do ângulo de partida, experimental e numérico, das esferas de vidro para os ângulos de inclinação: a) 40°, b) 50° e c) 60°.	75
Figura 4.17: Análise qualitativa dos regimes de escoamento das partículas de soja, numérico e experimental, para o ângulo de inclinação de 40°.....	78
Figura 4.18 Análise qualitativa dos regimes de escoamento das partículas de soja, numérico e experimental, para o ângulo de inclinação de 50°.....	79
Figura 4.19: Análise qualitativa dos regimes de escoamento das partículas de soja, numérico e experimental, para o ângulo de inclinação de 60°.....	80

Figura 4.20: Comparação de valores μ_{Spw} para partículas de soja com o disco rotatório operando a uma velocidade de rotação de 45 rpm, ângulo de inclinação de 40° e 8% de grau de preenchimento.	81
Figura 4.21: Comparativo do ângulo de partida, experimental e numérico, das partículas de soja para os ângulos de inclinação: a) 40°, b) 50° e c) 60°	82
Figura 4.22: Perfis de velocidade das partículas de vidro para o ângulo de inclinação de 50°: a) 2% e b) 5%.	84
Figura 4.23: Perfis de velocidade das partículas de vidro para o ângulo de inclinação de 60°: a) 2% e b) 5%.	85
Figura 4.24: Comparação dos perfis de velocidade da esfera de vidro variando o grau de preenchimento de 2% para 5% nos ângulos de inclinação a) 50° e b) 60°.	86
Figura 4.25: Comparação dos perfis de velocidade da esfera de vidro variando o ângulo de inclinação de 50° para 60° nos graus de preenchimento a) 2% e b) 5%.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Comparação entre as características do tambor rotatório e do disco rotatório (CAPES, 1980).....	7
Tabela 2.2: Equações para determinação da velocidade crítica de centrifugação (apud CHADWICK e BRIDGWATER (1997)).....	12
Tabela 2.3: Exemplo de matriz de confusão.....	28
Tabela 3.1: Condições de simulação aplicadas no software EDEM® 3.0	43
Tabela 3.2: Planejamento composto central utilizado na análise de sensibilidade dos parâmetros numéricos MED em um disco rotatório.	43
Tabela 3.3: Planejamento composto central utilizado na análise da influência das condições operacionais no número de contato entre as partículas.	44
Tabela 3.4: Valores de coeficiente de restituição utilizados nas simulações MED.	45
Tabela 4.1: Propriedades físicas e de escoamento dos materiais utilizados.	46
Tabela 4.2: Valores dos coeficientes de atrito estático e de rolamento obtidos experimentalmente.....	48
Tabela 4.3: Média dos desvios das equações para cálculo da velocidade crítica de centrifugação.	54
Tabela 4.4: Matriz de confusão da rede neural.....	56
Tabela 4.5: Métricas para avaliação do desempenho da rede neural.....	56
Tabela 4.6: Velocidades de rotação encontradas pelas técnicas de análise por imagem e análise por acústica, para a transição dos regimes de cascateamento-catarateamento, utilizando partículas de soja.	59
Tabela 4.7: Velocidades de rotação encontradas pelas técnicas de análise por imagem e análise por acústica, para a transição dos regimes de catarateamento-centrifugação, para as partículas de soja e de vidro.	59
Tabela 4.8: Valores experimentais dos parâmetros MED implementados na modelagem.	69
Tabela 4.9: Valores de μ_{spw} para esferas de vidro encontrados na calibração.	71

Tabela 4.10: Média dos desvios dos ângulos de partida, experimental e numéricos, para as esferas de vidro.....	76
Tabela 4.11: Valores de μ_{Spw} para partículas de soja encontrados na calibração.....	77
Tabela 4.12: Média dos desvios dos ângulos de partida, experimental e numéricos, para as partículas de soja	83
Tabela 4.13: Influência do grau de preenchimento na espessura da camada ativa e passiva para esferas de vidro.....	87
Tabela 4.14: Influência do ângulo de inclinação na espessura da camada ativa e passiva para esferas de vidro.....	87

LISTA DE SÍMBOLOS

D	Diâmetro	$M^0 L^1 T^0$
d_c	Diâmetro do círculo circunscrito	$M^0 L^1 T^0$
d_i	Diâmetro do círculo inscrito	$M^0 L^1 T^0$
D_v	Diâmetro volumétrico	$M^0 L^1 T^0$
D_p	Distância percorrida	$M^0 L^1 T^0$
e_p	Coeficiente de restituição	$M^0 L^0 T^0$
$e_{p,pw}$	Coeficiente de restituição partícula-parede	$M^0 L^0 T^0$
$e_{p,pp}$	Coeficiente de restituição partícula-partícula	$M^0 L^0 T^0$
E_c	Módulo de Young da chapa	$M^1 L^{-1} T^{-2}$
E_p	Módulo de Young da partícula	$M^1 L^{-1} T^{-2}$
E_i	Módulo de Young da partícula i	$M^1 L^{-1} T^{-2}$
E_j	Módulo de Young da partícula j	$M^1 L^{-1} T^{-2}$
E^*	Módulo de Young equivalente	$M^1 L^{-1} T^{-2}$
\vec{F}_f	Força de atrito	$M^1 L^1 T^{-2}$
\vec{F}_{ij}	Força entre as partículas i e j	$M^1 L^1 T^{-2}$
\vec{F}_N	Força normal	$M^1 L^1 T^{-2}$
\vec{F}_N^d	Força normal de amortecimento	$M^1 L^1 T^{-2}$
\vec{F}_t	Força tangencial	$M^1 L^1 T^{-2}$
\vec{F}_t^d	Força tangencial de amortecimento	$M^1 L^1 T^{-2}$
$\vec{F}_{t,\max}$	Força tangencial máxima	$M^1 L^1 T^{-2}$
f	Grau de preenchimento	$M^0 L^0 T^0$
F_r	Número de Froude	$M^0 L^0 T^0$
g	Gravidade	$M^0 L^1 T^{-2}$
G_i	Modulo de Cisalhamento da partícula i	$M^1 L^{-1} T^{-2}$
G_j	Modulo de Cisalhamento da partícula j	$M^1 L^{-1} T^{-2}$

G^*	Modulo de Cisalhamento equivalente	$M^1 L^{-1} T^{-2}$
h	Altura da borda do disco rotatório	$M^0 L^1 T^0$
h_{disp}	Altura do dispositivo	$M^0 L^1 T^0$
h_1	Altura do rebote	$M^0 L^1 T^0$
h_0	Altura inicial	$M^0 L^1 T^0$
I_i	Momento de inercia da partícula i	$M^1 L^2 T^0$
m	Massa	$M^1 L^0 T^0$
m_i	Massa da partícula i	$M^1 L^0 T^0$
m_j	Massa da partícula j	$M^1 L^0 T^0$
m_p	Massa da partícula	$M^1 L^0 T^0$
m^*	Massa equivalente	$M^1 L^0 T^0$
R	Raio	$M^0 L^1 T^0$
R_{\min}	Raio da menor partícula	$M^0 L^1 T^0$
R_i	Raio da partícula i	$M^0 L^1 T^0$
R_j	Raio da partícula j	$M^0 L^1 T^0$
R^*	Raio equivalente	$M^0 L^1 T^0$
S_N	Rigidez normal	$M^1 L^0 T^{-2}$
S_n	Rigidez tangencial	$M^1 L^0 T^{-2}$
t	Tempo	$M^0 L^0 T^1$
t_c	Tempo crítico	$M^0 L^0 T^1$
\vec{v}_i	Velocidade translacional da partícula i	$M^0 L^1 T^{-1}$
v^{rel}	Velocidade relativa	$M^0 L^1 T^{-1}$
v_0	Velocidade relativa anterior a colisão	$M^0 L^1 T^{-1}$
v_1	Velocidade relativa posterior a colisão	$M^0 L^1 T^{-1}$
V_p	Volume da partícula	$M^0 L^3 T^0$
V_{disco}	Volume do disco rotatório	$M^0 L^3 T^0$
V_T	Volume total do leito granular	$M^0 L^3 T^0$
x_i	Posição escalar da partícula i	$M^0 L^1 T^0$

Símbolos gregos

α	Ângulo	$M^0 L^0 T^0$
β	Coeficiente de amortecimento	$M^1 L^0 T^{-1}$
$\vec{\delta}_N$	Deslocamento normal	$M^0 L^1 T^0$
$\vec{\delta}_t$	Deslocamento tangencial	$M^0 L^1 T^0$
η	<i>Holdup</i> dos sólidos	$M^0 L^0 T^0$
θ	Inclinação do disco rotatório	$M^0 L^0 T^0$
Θ	Ângulo de repouso	$M^0 L^0 T^0$
Θ_E	Ângulo de repouso estático	$M^0 L^0 T^0$
Θ_D	Ângulo de repouso dinâmico	$M^0 L^0 T^0$
λ	Parâmetro inelástico	$M^0 L^0 T^0$
μ_k	Coeficiente de atrito cinético	$M^0 L^0 T^0$
μ_s	Coeficiente de atrito estático	$M^0 L^0 T^0$
$\mu_{s,pp}$	Coeficiente de atrito estático partícula-partícula	$M^0 L^0 T^0$
$\mu_{s,pw}$	Coeficiente de atrito estático partícula-parede	$M^0 L^0 T^0$
μ_R	Coeficiente de atrito de rolamento	$M^0 L^0 T^0$
$\mu_{R,pp}$	Coeficiente de atrito de rolamento partícula-partícula	$M^0 L^0 T^0$
$\mu_{R,pw}$	Coeficiente de atrito de rolamento partícula-parede	$M^0 L^0 T^0$
ξ	Porosidade do leito granular	$M^0 L^0 T^0$
ρ	Densidade	$M^1 L^{-3} T^0$
ρ_p	Densidade da partícula	$M^1 L^{-3} T^0$
ρ_c	Densidade da chapa	$M^1 L^{-3} T^0$
σ	Ângulo de partida	$M^0 L^0 T^0$
$\vec{\tau}$	Torque	$M^1 L^2 T^{-2}$
$\vec{\tau}_{ij}$	Torque entre as partículas i e j	$M^1 L^2 T^{-2}$
ν	Razão de Poisson	$M^0 L^0 T^0$
ν_i	Razão de Poisson da partícula i	$M^0 L^0 T^0$
ν_j	Razão de Poisson da partícula j	$M^0 L^0 T^0$
ν_p	Razão de Poisson da partícula	$M^0 L^0 T^0$

ν_c	Razão de Poisson da chapa	$M^0 L^0 T^0$
φ_i	Posição angular da partícula i	$M^0 L^1 T^0$
ϕ	Esfericidade	$M^0 L^0 T^0$
$\bar{\omega}$	Velocidade de rotação	$M^0 L^1 T^{-1}$
ω_c	Velocidade de rotação crítica	$M^0 L^1 T^{-1}$
$\vec{\omega}_i$	Velocidade angular da partícula i	$M^0 L^1 T^{-1}$

RESUMO

O processo de granulação dependente diretamente de como as partículas ou grãos movimentam-se no interior do disco rotatório, sendo este comportamento bastante complexo e ainda pouco compreendido. O conhecimento sobre a dinâmica das partículas é essencial para otimização e escalonamento dos projetos envolvendo o disco rotatório e também para uma melhor eficiência do processo de granulação. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo estudar, a partir de dados experimentais e numéricos, a influência das condições operacionais do disco rotatório na dinâmica dos materiais granulares soja e vidro. Verificou-se que maiores velocidades de rotação e menores do ângulo de inclinação resultaram em um aumento na retenção de material granular (*holdup* de sólidos) no interior do disco rotatório. Percebeu-se ainda que, pelo fato de apresentar um leito granular mais rígido e compactado, as partículas de soja apresentaram um maior *holdup* de sólidos, quando comparadas com as esferas de vidro. A transição dos regimes de escoamento foi avaliada pela técnica de análise por imagens e foi possível observar que as condições operacionais analisadas (grau de preenchimento: 2, 5 e 8% e ângulo de inclinação: 40, 50 e 60°) e as propriedades físicas dos materiais influenciaram velocidade de rotação necessária para transição dos regimes de escoamento. As imagens obtidas por esta técnica também foram utilizadas para o treinamento e validade de uma rede neural convolucional. A rede proposta apresentou uma acurácia de 98%, conseguindo classificar corretamente 353 das 360 imagens que lhe foram fornecidas. Pelo fato da análise por imagem ser uma técnica qualitativa, foi proposta a metodologia de análise por acústica, sendo uma nova técnica para a identificação da transição dos regimes de escoamento. A técnica de análise por acústica demonstrou ser uma excelente alternativa no estudo da dinâmica de partículas, visto que ela conseguiu identificar a transição cascateamento-catarateamento para as partículas de soja, além de determinar o momento exato em que ocorreu a centrifugação das partículas. Também foi realizado uma modificação no modelo de Papadakis e Bomblet (1961) para o cálculo da velocidade crítica de centrifugação, com a inclusão do termo do grau de preenchimento, o que resultou em uma média dos desvios de 14,27%. Como uma ferramenta complementar aos estudos experimentais, foi utilizado a abordagem numérica Lagrangeana, por meio do Método dos Elementos Discretos (MED), como auxílio à compreensão do escoamento dos materiais granulares. Realizou-se uma análise de sensibilidade tanto dos parâmetros numérico MED, quanto das condições operacionais sobre o número de contato entre as partículas. Em relação aos parâmetros MED, verificou-se que o coeficiente de atrito estático partícula-parede foi o parâmetro que apresentou maior efeito sobre a resposta, já para as condições operacionais o número de contato partícula-partícula foi mais afetado pelas mudanças do grau de preenchimento e da velocidade de rotação. O MED também foi utilizado para avaliar os regimes de escoamento. Notou-se que os valores obtidos experimentalmente dos parâmetros MED, quando implementados no modelo, não conseguiram representar de forma adequada as observações experimentais, sendo necessário um processo de calibração. Para as partículas de soja, verificou-se que a calibração do coeficiente de atrito estático partícula-parede não foi suficiente para a resposta numérica reproduzisse a experimental, sendo necessário um estudo mais aprofundado da influência dos outros parâmetros e da esfericidade da partícula. Já para as esferas de vidro, após a calibração, verificou-se que o Método dos Elementos Discretos conseguiu representar de forma adequada o comportamento granular no interior do disco rotatório e que os valores dos parâmetros obtidos pela calibração estiveram dentro do desvio padrão da medida experimental, conseguindo manter o significado físico dos parâmetros.

Palavras-chave: dinâmica de partículas, regimes de escoamento, abordagem lagrangeana, MED, parâmetros numéricos.

ABSTRACT

The granulation process directly depends on how the particles or grains move inside the dish granulator, this behavior being quite complex and still poorly understood. Knowledge about particle dynamics is essential for optimizing and scaling projects involving the dish granulator and improving granulation process efficiency. In this context, the present work aimed to study, experimentally and numerically, the influence of the operating conditions of the dish granulator on the dynamics of soy and glass granular materials. It was found that higher rotation speeds and lower inclination angles increased the solids holdup inside the dish granulator. It was also noticed that, as it has a more rigid and compacted granular bed, the soybean particles presented a greater solids holdup when compared to the glass spheres. The transition of the flow regimes was evaluated by the image analysis method and it was possible to observe that the operational conditions analyzed (filling degree: 2, 5, and 8% and inclination angle: 40, 50, and 60°) and the physical properties of the materials influenced the rotation speed necessary for the transition of the flow regimes. The images obtained by this method were also used for the training and validity of a convolutional neural network. The proposed network presented an accuracy of 98%, correctly classifying 353 of the 360 images provided to it. Because image analysis is a qualitative method, the acoustic analysis methodology was proposed as a new method for identifying the transition of flow regimes. The acoustic analysis method proved to be an excellent alternative in the study of particle dynamics, as it was able to identify the cascading-cataracting transition for soybean particles, in addition to determining the exact moment in which the particles centrifugation took place. A modification was also carried out in the Papadakis and Bomble (1961) model to calculate the critical centrifugation speed. The filling degree addition resulted in an average deviation of 14.27%. As a complementary tool to experimental studies, the Lagrangian numerical approach was used, through the Discrete Element Method (DEM), as an aid to understanding the flow of granular materials. A sensitivity analysis of both the DEM numerical parameters and the operational conditions on the contact number between particles was performed. Regarding the DEM parameters, it was found that the particle-wall static friction coefficient was the parameter that had the greatest effect on the response, whereas, for the operational conditions, the particle-particle contact number was more affected by changes in the filling degree and the speed rotation. DEM was also used to assess runoff regimes. It was noted that the experimentally obtained values of the DEM parameters, when implemented in the model, could not adequately represent the experimental observations, requiring a calibration process. For soybean particles, it was found that the calibration of the particle-wall static friction coefficient was not sufficient for the numerical response to reproduce the experimental one, requiring more study of the influence of other parameters and the particle sphericity. As for the glass spheres, after calibration, it was found that the Discrete Element Method was able to represent the granular behavior inside the dish granulator and that the values of the parameters obtained by calibration were within the standard deviation of the experimental measurement, maintaining the physical properties.

Keywords: particle dynamics, flow regimes, Lagrangian approach, DEM, numerical parameters.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O processo de granulação desempenha um papel importante na eficiência de diversos setores industriais. Os aglomerados podem ser formados devido a adição de um meio ligante e constante agitação. A agitação intensifica o contato sólido-sólido e sólido-líquido, desenvolvendo forças de ligação e formando os aglomerados (CAPES, 1980; CHADWICK e BRIDGWATER, 1997). Esse processo permite o controle das propriedades físicas dos materiais granulares formados, resultando em um produto final mais uniforme, resistente e de melhor qualidade. Para isso, torna-se primordial estudar o desempenho dos equipamentos empregados no processo de granulação.

Dentre os vários tipos de granuladores industriais, o disco rotatório se destaca devido a sua capacidade de classificar o material particulado por tamanho e devido também a sua geometria relativamente simples, que consiste em um prato inclinado que gira em torno do próprio eixo (CAPES, 1980; LITSTER e ENNIS, 2004). À medida que acontece o processo de granulação, o leito granular apresenta uma segregação, onde as partículas menores tendem a acumular ao fundo do equipamento, enquanto as maiores se localizam na parte superior do leito, até serem expelidas do disco rotatório (KAPUR, 1978; PIETSCH, 1991). Toda a etapa desde a adição do pó fino no disco rotatório, passando pela formação dos aglomerados e até serem retirados do equipamento é conhecido como tempo de residência do material granular. O tempo de residência é afetado pelas condições operacionais e principalmente pelo *holdup* de sólidos do disco rotatório, que é uma medida que indica o quanto de material granular o equipamento consegue reter no seu interior. Se ao final do tempo de residência o tamanho dos aglomerados formados for menor que o tamanho padrão desejado, eles são devolvidos para o processo na forma de reciclo e caso os aglomerados apresentem um tamanho maior que o padrão, eles são moídos e reciclados. Altas taxas de reciclo não são adequadas neste processo e comprometem etapas subsequentes do processo, como a secagem, o resfriamento e o peneiramento dos grãos.

Para se ter um controle das características do produto final, é necessária uma compreensão da influência das condições operacionais do equipamento e das características do sólido (LITSTER e ENNIS, 2004). Essas variáveis interferem diretamente no movimento de partículas no interior do disco rotatório, fazendo o leito granular apresentar diversos regimes de escoamento, tais como: rolamento, cascateamento, catarateamento e centrifugação (CAPES,

1980; LITSTER e ENNIS, 2004). Com exceção do último regime, cada um dos demais possui aspectos positivos e negativos no processo de granulação. Nos regimes de rolamento e cascateamento o contato entre as partículas é mais eficiente. Entretanto, devido ao menor tempo de residência e de retenção de sólidos, pode-se gerar grãos de tamanho menor que o desejado. Já no regime de catarateamento, grãos maiores e mais compactados são formados, porém deve-se ter cuidado ao se trabalhar nesse regime, pois a depender da intensidade da agitação, pode resultar em um crescimento descontrolado dos aglomerados e até a quebra das partículas (PIETSCH, 1991).

A compreensão da dinâmica das partículas é um fator essencial para a otimização e desenvolvimento de projetos envolvendo o disco rotatório, visto que, o processo de granulação está diretamente relacionado com o movimento granular. Entretanto, poucos trabalhos têm se empenhando em estudar o comportamento dinâmico da fase particulada no disco rotatório. Desse modo, estudos teóricos e experimentais se tornam cada vez mais necessários com o intuito de elucidar o comportamento granular nesse equipamento.

Juntamente com os estudos experimentais, os métodos numéricos surgem como uma ferramenta complementar. Eles conseguem superar as limitações impostas por questões de segurança e possibilitam adquirir um maior nível de detalhamento da movimentação das partículas, uma vez que as simulações possibilitam a obtenção de informações a qualquer ponto do processo. Além disso, as simulações numéricas permitem avaliar diferentes configurações de equipamentos, reduzindo custos e tempo na elaboração de novos protótipos. Entretanto, qualquer modelagem precisar ser verificada experimentalmente.

Em problemas envolvendo sistemas particulados, pode-se ser empregado duas abordagens numérica, sendo ela a Euleriana e a Lagrangeana. Na primeira abordagem as respostas são obtidas por meio da resolução das equações diferenciais de transferência de massa, energia e quantidade de movimento, onde as fases, fluida e sólidas, são tratadas como interpenetrantes e contínuas. Já na abordagem Lagrangeana, o Método dos Elementos Discreto (MED) é uma técnica bem consolidada, sendo largamente aplicada em pesquisas envolvendo comportamento de materiais granulares. Esse método, aplica em cada partícula no sistema um balanço de forças, levando em consideração as interações partícula-partícula e partícula-parede (CUNDALL e STRACK, 1979; TSUJI; TANAKA; ISHIDA, 1992). Desse modo, é possível obter uma melhor compreensão acerca do escoamento granular no interior do disco rotatório.

Apesar dos benefícios da utilização do MED, este método possui certas limitações. A primeira é que o custo computacional está diretamente relacionado com o número de partículas

presente no sistema, o que acaba restringindo simulações numéricas em escala industrial e até mesmo em escala piloto. A segunda limitação está relacionada com a necessidade da especificação dos parâmetros de entrada no modelo (coeficiente de restituição, coeficiente de atrito estático e coeficiente de atrito de rolamento).

Atualmente, os parâmetros numéricos são obtidos por medidas experimentais ou por um processo de calibração. No primeiro procedimento, apesar de preservar o significado físico dos parâmetros MED, não existe nenhuma metodologia padronizada para se determinar os valores e também, não existe a garantia que esses valores serão representativos no conjunto populacional de partículas (COETZEE, 2017). No procedimento de calibração, os parâmetros da modelagem são utilizados como parâmetros de ajustes, adotando a combinação que melhor se adequa ao seu sistema e, por causa disso, mais de uma combinação de valores podem apresentar resultados condizentes e não necessariamente representar o real significado físico do parâmetro (COETZEE, 2017; MARIGO e STITT, 2015).

Para que as respostas numéricas obtidas pelo MED sejam representativas com as observações experimentais, se faz necessário a correta atribuição dos valores dos parâmetros de entrada no modelo.

Dadas as informações que foram expostas, a seguir são apresentados os objetivos do trabalho.

1.1. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi estudar, a partir de dados experimentais e numéricos, a dinâmica de partículas no interior de um disco rotatório.

Para se atingir o objetivo geral deste trabalho, os objetivos específicos são:

1.1.1. Objetivos específicos

- Caracterizar os materiais particulados, utilizando metodologias para a determinação do coeficiente de atrito estático e do coeficiente de atrito de rolamento, para partícula esférica e não-esférica;
- Investigar o *holdup* dos sólidos do disco rotatório para diferentes ângulos de inclinação e velocidade de rotação;

- Investigar a transição entre os regimes de escoamento em um disco rotatório sob diferentes condições operacionais, aplicando técnicas por análise de imagens e por análise da acústica do movimento das partículas;
- Propor uma rede neural convolucional para a determinação dos regimes de escoamento;
- Determinar o ângulo de partida de materiais com diferentes propriedades físicas em um disco rotatório operando sob diferentes condições operacionais.
- Calcular a velocidade das partículas na superfície do leito granular.
- Realizar a análise de sensibilidade dos parâmetros numéricos MED e das condições operacionais do disco rotatório, no número de contato entre as partículas;
- Aplicar o método dos elementos discretos na caracterização do escoamento granular do disco rotatório, bem como analisar as camadas ativas e passivas do leito granular no equipamento operando em regime de rolamento.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para uma melhor compreensão, neste capítulo será apresentado o embasamento teórico referente aos principais conteúdos explorados nesse trabalho. Os temas abordados referem-se ao disco rotatório e os seus regimes de escoamento, bem como sobre o método dos elementos discretos e seus parâmetros numéricos.

2.1. Disco Rotatório

A granulação é um processo muito aplicado em indústrias de fertilizantes, siderúrgicas, farmacêuticas, alimentícias e entre outras. Ela possibilita a conversão de pós finos em materiais granulares com formatos estruturais mais uteis, o que facilita a distribuição, administração e o armazenamento do material, além de reduzir a perda do material por poeira e os riscos de manuseio (CAPES, 1980; LITSTER e ENNIS, 2004; PIETSCH, 1991).

Dentre os equipamentos destinados a realização da granulação destaca-se o tambor rotatório e o disco rotatório. Na literatura é possível encontrar diversos nomes atribuídos ao disco rotatório, tais como: disco inclinado (CAPES, 1980; CHADWICK, ROUGH; BRIDGWATER, 2005), disco granulador (BALL, 1959; CHADWICK e BRIDGWATER, 1997; CLEARY e SINNOTT, 2008; OBRANIAK e LAWINSKA, 2018), disco rotatório (REHDER, 2019; VIEIRA NETO *et al.*, 2017) e panela granuladora (AZRAR; ZENTAR; ABRIAK, 2016; CHAI *et al.*, 2017; FUJIHASHI *et al.*, 2013). Neste trabalho será adotado o nome disco rotatório.

O disco consiste em um prato rotativo de diâmetro (D), com uma borda lateral (h) e podendo ser inclinado (θ) de 0° a 90° em relação a horizontal (Figura 2.1).



Figura 2.1: Diagrama esquemático do disco rotatório (CHADWICK; ROUGH; BRIDGWATER, 2005).

2.1.1. Modificações no disco rotatório

Ao longo dos anos foram propostas diferentes configurações para o disco rotatório. O objetivo era obter uma melhor eficiência do equipamento e assim, conseguir atingir um melhor controle do tamanho, da forma e da qualidade do produto final. A Figura 2.2 ilustra três das principais modificações realizadas.

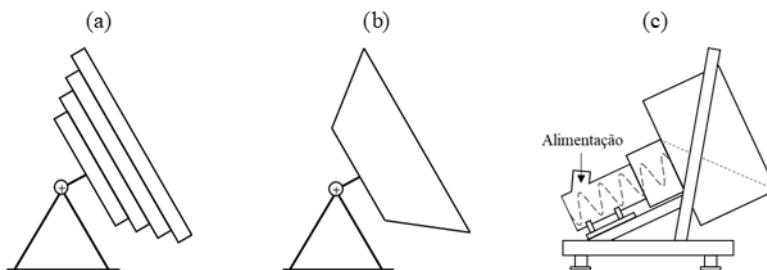


Figura 2.2: Diferentes configurações do disco rotatório: (a) disco com paredes laterais em degraus; (b) disco com as paredes laterais em cone e (c) disco com alimentação central (CAPES, 1980).

A Figura 2.2a apresenta o esquema de um disco rotatório com a borda lateral em forma de degrau. Essa modificação visa enfatizar a segregação das partículas por tamanho, separando os aglomerados finos dos grossos. O pó fino é alimentado no anel central do equipamento e conforme a granulação acontece, os grãos maiores migram para os degraus mais externos.

De acordo com Capes (1980), esse projeto de disco rotatório resulta em uma formação de grãos mais fortes e uniformes. Os grãos maiores rolam sobre uma superfície rígida (parede do disco), em vez de em um leito profundo e macio de partículas finas.

Uma outra configuração é de um disco rotatório na forma de um cone truncado, apresentado na Figura 2.2b. Essa modificação combina a ação classificadora do disco junto com a velocidade periférica do tambor rotatório. A influência da velocidade resulta em uma maior compactação dos grãos, à medida em que eles são segregados ao longo da borda, até a sua descarga (PIETSCH, 1991).

Por fim, a Figura 2.2c sugere uma alteração na forma de alimentação do equipamento. Na alimentação tradicional, o material é despejado na parte superior do disco rotatório com o auxílio de uma esteira externa, esse processo resulta em uma grande geração de poeira, além de dificultar o acesso a parte frontal da unidade. Para a eliminação desses problemas a nova configuração (Figura 2.2c) utiliza um alimentador do tipo rosca sem fim, onde o pó fino é descarregado ao fundo e na parte central do equipamento. Destaca-se que, esse modelo de disco rotatório opera com uma altura de borda maior que os discos tradicionais (CAPES, 1980; PIETSCH, 1991).

2.1.2. Comparação entre disco rotatório e tambor rotatório

Outro equipamento largamente utilizado em processos de granulação é o tambor rotatório (Figura 2.3). O dispositivo consiste em um cilindro rotativo levemente inclinado para a horizontal (θ), com o objetivo de facilitar o transporte de material ao longo do comprimento do tambor (WALKER, 2007).

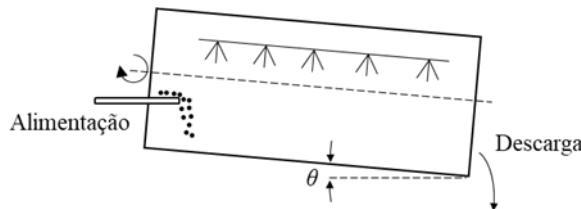


Figura 2.3: Diagrama esquemático de um tambor rotatório (Adaptado de FAYED e OTTEN, 1997).

Os tambores não possuem a mesma ação classificadora do disco rotatório e acabam produzindo aglomerados com uma ampla distribuição de tamanho. Assim, para uma melhor seleção dos grãos, peneiras são utilizadas logo após o processo, onde os grãos de maior tamanho são esmagados e reciclados juntamente com os grãos de menor tamanho.

Capes (1980) comparou a utilização do disco e do tambor rotatório em um processo de granulação de minério de ferro. De acordo com os autores como o custo de cada equipamento foi semelhante, a escolha de qual utilizar deve ser realizada por outros fatores. As diferenças entre os equipamentos são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Comparação entre as características do tambor rotatório e do disco rotatório (CAPES, 1980).

Tambor rotatório	Disco rotatório
Maior capacidade de produção	Custo de investimento semelhantes
Maior tempo de permanência do aglomerado no processo	Trabalho manual igual
Menor produção de poeira	Melhor ação classificadora Requer 10% menos de espaço Qualidade de produto semelhantes Menor ruído

Apesar de ambos equipamentos apresentarem comportamentos semelhantes e serem largamente aplicados em processos industriais, somente o tambor rotatório possui uma literatura abrangente a respeito do escoamento do material granular (DELELE *et al.*, 2016;

HENEIN; BRIMACOMBE; WATKINSON, 1983; MELLMANN, 2001; SANTOMASO *et al.*, 2003; SANTOS *et al.*, 2014; SANTOS *et al.*, 2016). Demonstrando assim a importância dos estudos realizados nesta Tese. Assim, para descrever as características dos regimes de escoamento, serão utilizados como referências trabalhos de tambores rotatórios, visto que, o movimento granular neste equipamento tem características similares ao do disco.

2.1.3. Regimes de escoamento

Apesar da geometria ser relativamente simples, o comportamento granular no interior do disco rotatório possui certa complexidade. O movimento do leito de partículas pode apresentar até seis regimes de escoamento que são classificados em: deslizamento, avalanche, rolamento, cascateamento, catarateamento e centrifugação (Figura 2.4). A transição entre esses regimes é influenciada pelo grau de preenchimento, pelas características da partícula, pelas propriedades friccionais e pelo número de Froude (HENEIN; BRIMACOMBE; WATKINSON, 1983; MELLMANN, 2001).

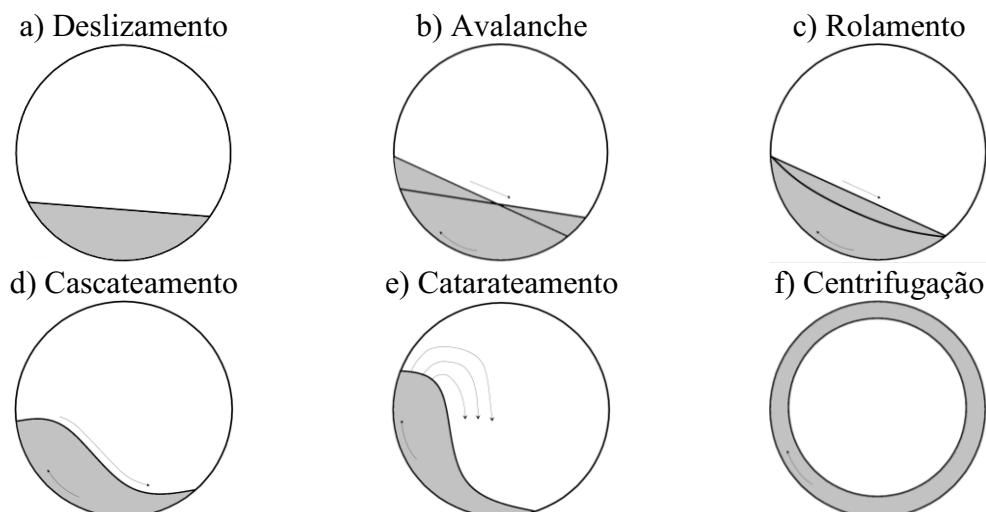


Figura 2.4: Regimes de escoamento em um disco rotatório (MELLMANN, 2001).

Conforme apresentado pela Equação (2.1), o número de Froude (F_r) é uma relação entre as forças centrífuga e gravitacional e pode representar uma indicação da transição dos regimes de escoamento.

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

sendo: ω a velocidade de rotação, R o raio do equipamento e g a aceleração da gravidade.

Regime de deslizamento

O primeiro dos regimes de escoamento é caracterizado por um leito praticamente estático, se comportando como um corpo rígido. Ele é obtido devido à baixa velocidade de rotação e quando o atrito entre o leito granular e a parede do equipamento é baixa. Como praticamente não existe movimentação das partículas, esse regime não apresenta nenhuma aplicação industrial e para evitá-lo, costuma-se utilizar superfícies mais rugosas (CHADWICK e BRIDGWATER, 1997; RUTGERS, 1965; SHERITT *et al.*, 2003).

Regime de avalanche

No regime de avalanche o leito granular apresenta dois ângulos de repouso, um superior e outro inferior. Esse fenômeno acontece devido ao aumento da velocidade de rotação e/ou da rugosidade da parede, em relação ao regime de deslizamento.

Neste regime as partículas são erguidas como um corpo rígido até atingir uma inclinação superior, após essa inclinação, o leito se desprende da superfície e cai em avalanche, até uma inclinação inferior. Com o aumento da velocidade de rotação a variação dos ângulos de repouso (superior e inferior) tendem a diminuir, atingindo um fluxo uniforme e iniciando assim o regime de rolamento (HENEIN; BRIMACOMBE; WATKINSON, 1983; HLOSTA *et al.*, 2020).

Regime de rolamento

O regime de rolamento apresenta como característica uma angulação fixa e a presença de duas regiões, como podem ser vistas na Figura 2.5. A primeira região é chamada de passiva, onde as partículas movimentam-se como um corpo sólido, no mesmo sentido da rotação do tambor. Ao longo dessa região as velocidades das partículas tendem a diminuir, até atingir valores aproximadamente nulos na interface com a região ativa. A segunda região é a ativa, onde as partículas apresentam uma maior dinâmica e se movimentam no sentido oposto ao da região passiva (DELELE *et al.*, 2016; DUBÉ *et al.*, 2013; SANTOS *et al.*, 2013).

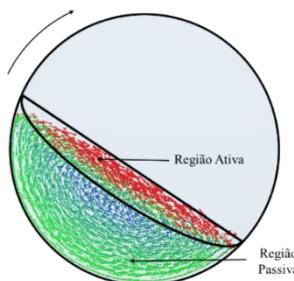


Figura 2.5: Representação das regiões ativa e passiva no regime de rolamento.

Devido ao rolamento das partículas e ao elevado contato entre elas, o processo de granulação ocorre preferencialmente neste regime (CAPES, 1980; CHADWICK e BRIDGWATER, 1997; CLEARY e SINNOTT, 2008). De acordo com Mellmann (2001), diversas outras aplicações industriais acontecem no regime de rolamento, pois ele proporciona condições favoráveis para transferência de calor e garantem uma qualidade uniforme do produto.

Por meio de uma medição direta da velocidade de partículas de vidro, Santos *et al.* (2013) conseguiram caracterizar em um tambor rotatório cada uma das regiões (ativa e passiva) presentes no regime de rolamento. Resende *et al.* (2017) encontraram resultados semelhantes para medição do perfil de velocidade de grãos de café em um tambor rotativo.

Regime de cascataamento

Com o aumento da velocidade de rotação, o leito granular começa a apresentar um formato de curvo, semelhante a um “S”, indicando a transição entre os regimes de rolamento e cascataamento. Esse formato fica em maior evidência conforme aumenta a velocidade de rotação do equipamento.

Assim, como o regime de rolamento, o regime de cascataamento também é muito aplicado no processo de granulação. A maior velocidade de rotação acarreta em um aumento da aglomeração das partículas, acelerando a formação dos grãos. Porém, velocidades excessivas podem conduzir a um crescimento descontrolado, afetando a qualidade e a uniformidade do aglomerado (CAPES, 1980; WALKER, 2007).

Regime de catarateamento

O regime de catarateamento é alcançado quando as partículas começam a se desprender do leito granular, sendo lançadas no espaço vazio do interior do equipamento. Conforme a velocidade de rotação aumenta, aumenta-se o comprimento da trajetória e o número de partículas que são lançadas, formando algo semelhante a um “véu” (GOVENDER, 2016; MACHADO *et al.*, 2017; SANTOMASO *et al.*, 2003).

Devido à alta rotação do tambor ou do disco, as partículas adquirem uma elevada dinâmica fazendo com que a força das colisões seja muito intensa. Devido a este motivo, o regime de catarateamento não é muito recomendado no processo de granulação, pois pode ocasionar a degradação do aglomerado. Este regime é muito aplicado nos processos de moagem.

Regime de centrifugação

O último dos regimes de escoamento é a centrifugação, quando as partículas se aderem a parede do cilindro (Figura 2.6). Essa aderência pode ser parcial, quando uma primeira camada de partículas se prende à parede do equipamento (Figura 2.6a), ou total, quando todas as partículas se aderem à parede do equipamento, conforme demonstrado pela Figura 2.6b (SANTOS *et al.*, 2013; SANTOS *et al.*, 2016; WATANABE, 1999).



Figura 2.6: Representação dos tipos de centrifugação em um tambor rotatório: a) somente a camada mais externa das partículas; b)aderidas todas as partículas aderidas.

Neste regime as forças gravitacional e centrípeta se equilibram, resultando em um número de Froude unitário. Assim, a velocidade crítica de centrifugação (ω_c) pode ser expressa de acordo com a Equação 2.2

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

Esta condição só pode ser aplicada a equipamentos que operam completamente na horizontal ($\theta = \pi/2$) (CHADWICK e BRIDGWATER, 1997; MELLMANN, 2001). Para equipamentos que trabalham com inclinação, como é o caso do disco rotatório, a angulação deve ser contabilizada no cálculo da velocidade crítica (Equação 2.3) (PIETSCH, 1991).

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g \operatorname{sen}(\theta)}{R}} \quad (2.3)$$

Destaca-se que na Equação 2.3, ω_c é calculado em radiano por segundo (rad/s). Porém, na literatura é comumente encontrado a velocidade crítica sendo expressa em rotações por

minuto (rpm). Então, realizando manipulações algébricas e transformando as unidades, a velocidade crítica passa ser determinada pela Equação 2.4

$$\omega_c = 42,3 \sqrt{\frac{\operatorname{sen}(\theta)}{D}} \quad (2.4)$$

Ao longo dos anos, alguns autores se empenharam em estudar a velocidade crítica de centrifugação em disco rotatórios. Em Chadwick e Bridgwater (1997) são apresentadas algumas equações empíricas, com intuito de considerar as propriedades e variáveis do sistema que poderiam influenciar no valor de ω_c . Essas equações estão resumidas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Equações para determinação da velocidade crítica de centrifugação (apud CHADWICK e BRIDGWATER (1997)).

Klatt (1958)	$\omega_c = \frac{22,5}{\sqrt{D}}$	(2.5)
Bazilevich (1960)	$\omega_c = 42,3 \sqrt{\frac{\operatorname{sen}(\theta) - \operatorname{tg}(\Theta) \cos(\theta)}{D}}$	(2.6)
Papadakis e Blombled (1961)	$\omega_c = 42,3 \sqrt{\frac{\operatorname{sen}(\theta) - \operatorname{sen}(\Theta)}{D}}$	(2.7)
Macavei (1965)	$\omega_c = 16,75 \left[(V_0 - V_1) \left(\frac{k}{R^3} \right)^{1/2} \right]^{1/3}$	(2.8)
Young e Mccamy (1967)	$k = \operatorname{sen}(\theta) - (2\pi\theta/360)\cos(\theta)$ $V_0 = \left[(2 + 3^{1/2}) R g \operatorname{sen}(\theta) \right]^{1/2} \left(\frac{\sqrt{Rg}}{R^{3/2}} \right)^{1/4}$ $V_1 = \left[(2/3^{1/2}) R g \operatorname{sen}(\theta) \right]^{1/2} \left(\frac{g}{R} \right)^{1/4}$	(2.9)

sendo: Θ o ângulo de repouso da partícula e D, R e θ o diâmetro, raio e inclinação do equipamento, respectivamente.

Chadwick e Bridgwater (1997) discorreram em seu trabalho sobre o escoamento das partículas no disco rotatório. Os autores relataram a presença do regime de deslizamento devido

à baixa velocidade de rotação e a superfície lisa da parede do equipamento. Com o aumento da velocidade de rotação, os autores observaram e descreveram a caracterização dos demais regimes de escoamento (avalanche, rolamento, cascataamento e catarateamento), até ocorrer a centrifugação do material.

Rehder (2019) estudou a granulação de blends de chás em um disco rotatório. A autora observou que altas concentrações do material ligante elevaram o diâmetro dos grânulos formados e em baixas concentrações os grânulos foram fracos e quebradiços. De acordo com a autora, grânulos mais duros e resistentes foram formados quando se diminuiu a inclinação do disco rotatório.

A influência do tempo de granulação no disco rotatório foi analisada no trabalho de Azrar, Zentar e Abriak (2016). Os autores comentaram que quando se reduziu o tempo de granulação de sedimentos dragados, ocasionou a formação de aglomerados menores, indicando que diâmetro do aglomerado formado está diretamente ligado com o tempo de granulação.

Vieira Neto *et al.* (2017) avaliaram em um disco rotatório, os regimes de rolamento, cascataamento e centrifugação para dois graus de preenchimento do fertilizante superfosfato. Segundo os autores, com o aumento da massa, o disco rotatório necessitou de uma velocidade de rotação inferior para o leito granular atingir os regimes de rolamento e de cascataamento. Os autores também destacaram que foi possível caracterizar os regimes de escoamento utilizando a abordagem numérica Euler-Lagrange.

Trabalhos envolvendo simulações numéricas tem se destacado ao longo dos anos e são largamente reportados na literatura. Essas ferramentas surgem como uma alternativa para superar as limitações presentes nos estudos experimentais, ajudando na melhor compreensão do comportamento das partículas nos equipamentos.

Dentro das abordagens numéricas utilizadas para descrever o comportamento de materiais granulares, destaca-se o Método dos Elementos Discretos (MED). Esta abordagem se sobressai, pois ela realiza o balanço de força individualmente em cada partícula presente no sistema, acompanhando-as contato por contato e permitindo assim a visualização e utilização de partículas que possuem diferentes formatos (JUST *et al.*, 2013).

2.2. Método dos Elementos Discretos (MED)

O MED foi proposto inicialmente por Cundall e Strack (1979) em um estudo voltado para análise de fraturas em rochas. Esse método faz uso de um algoritmo *time-stepping* em que a mesma modelagem se repete a cada etapa do tempo. As partículas são acompanhadas

individualmente, contato por contato e os seus movimentos são atualizados com base nos resultados do passo de tempo anterior (POTYONDY e CUNDALL, 2004; RACKL e HANLEY, 2017; WU *et al.*, 2009). A Figura 2.7 demonstra, de forma simplificada, o ciclo matemático utilizado pelo método dos elementos discretos.

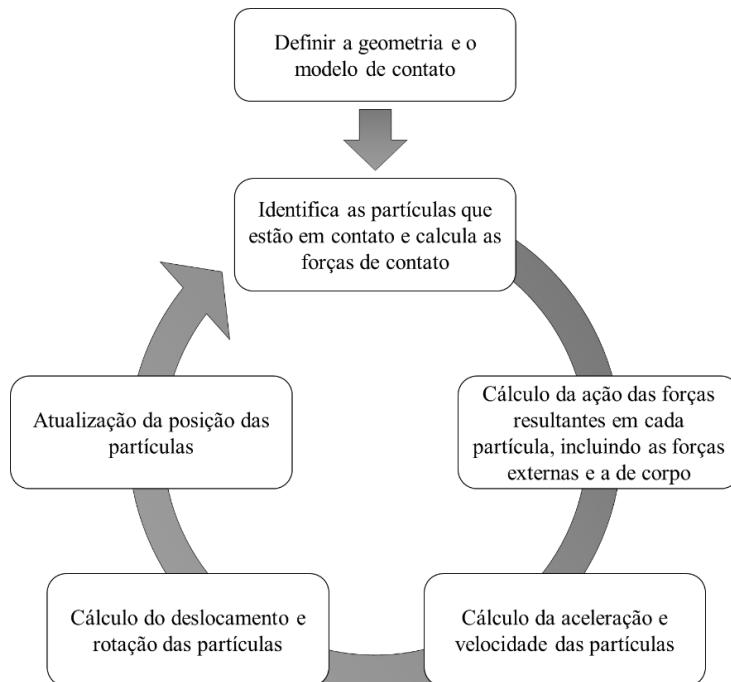


Figura 2.7: Fluxograma empregado nas simulações MED (Adaptado de SULLIVAN, 2011).

Os cálculos realizados pelo MED alternam entre a utilização da segunda lei de Newton (aplicada às partículas) e a lei da Força-Deslocamento (aplicada nos contatos entre as partículas). Conforme demonstrado pelas Equações 2.10 e 2.11, a segunda lei de Newton determina as acelerações de translação e rotação das partículas (HASSANPOUR e PASHA, 2016; SEVILLE e WU, 2016; WU, 2012).

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \sum_j \vec{F}_{ij} \quad (2.10)$$

$$I_i \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} = \sum_j \vec{\tau}_{ij} \quad (2.11)$$

sendo: t o tempo, m_i a massa da partícula i , I_i momento de inércia da partícula i , \vec{v}_i e $\vec{\omega}_i$ a velocidade translacional e angular da partícula i , respectivamente e \vec{F}_{ij} e $\vec{\tau}_{ij}$ são a força e o torque entre as partículas i e j , respectivamente.

Utilizando as Equações 2.10 e 2.11, as acelerações podem ser numericamente integradas, obtendo-se as Equações 2.12 a 2.15 para se determinar as velocidades (\vec{v} e $\vec{\omega}$) e os deslocamentos (x e φ) de partículas.

$$\vec{v}_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} = \vec{v}_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} + \left(\frac{\sum \vec{F}_{ij}}{m_i} \right) \Delta t \quad (2.12)$$

$$x_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} = x_i^t + \vec{v}_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} \Delta t \quad (2.13)$$

$$\vec{\omega}_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} = \vec{\omega}_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} + \left(\frac{\sum \vec{\tau}_{ij}}{I_i} \right) \Delta t \quad (2.14)$$

$$\varphi_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} = \varphi_i^t + \vec{\omega}_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} \Delta t \quad (2.15)$$

sendo: x_i e φ_i são a posição escalar e angular, respectivamente.

No que diz respeito à interação entre as partículas, os modelos MED são classificados em duas categorias: modelo de esfera rígida e o modelo de esfera macia. A abordagem de esfera rígida é mais limitada, porque são somente consideradas colisões binárias e instantâneas. Já a abordagem de esfera macia é recomendada para alta concentração granular, sendo bastante aplicada em simulações MED. Diferentemente da esfera rígida, no modelo de esfera macia as deformações são contabilizadas, permitindo que as partículas se sobreponham umas sobre as outras durante o contato (CUNDALL e STRACK, 1979; HASSANPOUR e PASHA, 2016).

Um modelo de esfera macia largamente empregado é o modelo não-linear de Hertz-Midlin, que propõe uma relação não linear entre a força (\vec{F}) e o deslocamento ($\vec{\delta}$), conforme apresentado nas Equações 2.16 e 2.17.

$$\vec{F}_N = \frac{4}{3} E^* \vec{\delta}_N^{3/2} \sqrt{R^*} \quad (2.16)$$

$$\vec{F}_t = -\vec{\delta}_t S_t \quad (2.17)$$

os subscritos N e t representam as componentes normal e tangencial. A variável S é a rigidez, e é calculada pelas equações 2.18 e 2.19

$$S_N = 2E^* \sqrt{R^* \delta_N} \quad (2.18)$$

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_N} \quad (2.19)$$

A massa (m^*), o raio (R^*), o módulo de Young (E^*) e o módulo de cisalhamento (G^*) equivalentes podem ser determinados pelas Equações 2.20 a 2.23, respectivamente:

$$m^* = \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \quad (2.20)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_j} \quad (2.21)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_j^2}{E_j} \quad (2.22)$$

$$\frac{1}{G^*} = \frac{2 - \nu_i}{G_i} + \frac{2 - \nu_j}{G_j} \quad (2.23)$$

os subscritos i e j são utilizados para indicar as partículas e ν é a razão de Poisson delas.

A força normal de amortecimento (\vec{F}_N^d) e a força tangencial de amortecimento (\vec{F}_t^d), são fornecidas pelas Equações 2.24 e 2.25, respectivamente.

$$\vec{F}_N^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_N m^*} v_N^{rel} \quad (2.24)$$

$$\vec{F}_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^*} v_t^{rel} \quad (2.25)$$

em que: v^{rel} é a velocidade relativa e β é o coeficiente de amortecimento, que é determinado pela Equação 2.26, como função do coeficiente de restituição da partícula (e_p).

$$\beta = \frac{\ln e_p}{\sqrt{\ln^2 e_p + \pi^2}} \quad (2.26)$$

A máxima força tangencial ($\vec{F}_{t,\max}$) é limitada pela lei do atrito de Coulomb, sendo calculada pela Equação 2.27 como uma função do coeficiente de atrito estático (μ_s) e da força normal (\vec{F}_N).

$$\vec{F}_{t,\max} = \mu_s \vec{F}_N \quad (2.27)$$

Para aplicações em que o atrito de rolamento (μ_R) tem um papel importante, ele pode ser incluído no torque ($\vec{\tau}$), conforme Equação 2.28:

$$\vec{\tau}_{ij} = -\mu_R \vec{F}_N R_i \vec{\omega}_i \quad (2.28)$$

Como pode ser observado, a modelagem MED envolve as propriedades físicas de cada partícula (massa, raio, densidade, módulo de cisalhamento, módulo de Young e razão de Poisson) e depende também dos parâmetros de interação (coeficiente de restituição, atrito estático e atrito de rolamento). O principal problema do método dos elementos discrete está na determinação dos parâmetros de interação, que pode ser realizada ou por medição direta ou por meio de um processo de calibração.

2.2.1. Passo no tempo

A escolha adequada de um passo no tempo é importante para que os cálculos do modelo sejam estáveis e a simulação produza resultados condizentes.

Como o método dos elementos discretos se baseia num algoritmo “*time-stepping*”, o valor escolhido de passo no tempo deve ser suficientemente pequeno para que, durante um único intervalo de tempo, os distúrbios só se propaguem de uma partícula para os seus vizinhos imediatos (POTYONDY e CUNDALL, 2004). A velocidade com que uma perturbação se propaga depende das propriedades físicas do sistema e o passo no tempo crítico pode ser determinado por meio do número de Rayleigh (Equação 2.29):

$$\Delta t_c = \frac{\pi R_{\min}}{0,163v + 0,8766} \sqrt{\frac{\rho_p}{G}} \quad (2.29)$$

O fato do passo no tempo crítico ser determinado com base no raio da menor esfera, garante que as ondas de perturbação não se propaguem para além do tamanho das partículas (Figura 2.8), garantindo que as trocas de informações aconteçam somente entre a vizinhança.



Figura 2.8: Esquema representativo do deslocamento da onda de Rayleigh (Adaptado de HASSANPOUR e PASHA, 2016).

2.2.2. Parâmetros numéricos MED

O comportamento das partículas depende da escolha dos valores dos parâmetros de entrada no modelo. Para que o MED consiga reproduzir de forma fidedigna o fenômeno físico, os valores dos parâmetros devem ser cuidadosamente selecionados (COETZEE, 2019; COETZEE e ELS, 2009).

A literatura apresenta duas abordagens destinadas a determinação dos parâmetros de entrada no modelo MED (COETZEE, 2017). Na primeira abordagem é conhecida como “Abordagem de Medição Direta” e consiste na medição experimental de forma direta e individual de cada um dos parâmetros de entrada. A segunda abordagem, “Abordagem de Calibração Bulk”, são testadas várias combinações dos parâmetros MED até que a resposta numérica se aproxime da resposta encontrada experimentalmente.

Realizando uma comparação entre as duas abordagens, a “Medição Direta” apresenta como principais vantagens a necessidade de um menor esforço computacional e o fato de conseguir preservar o significado físico dos parâmetros, porém não existe a garantia que os valores encontrados serão representativos em um conjunto populacional de partículas (*bulk*). Uma desvantagem dessa abordagem é que, além da dificuldade de medição, não existem metodologias padronizadas para determinação dos parâmetros de entrada, principalmente para partículas irregulares e pequenas (CHUNG e OOI, 2008; COETZEE, 2019; GONZÁLEZ-MONTELLANO *et al.*, 2012; MARIGO e STITT, 2015)

Na “Calibração Bulk” não há a necessidade da realização de experimentos para a determinação dos parâmetros, diminuindo o esforço experimental. Uma outra vantagem é a precisão das respostas, visto que se utiliza a combinação de parâmetros que mais aproxima os resultados numéricos dos experimentais. As desvantagens dessa metodologia são: maior

esforço computacional, não preserva o significado físico dos parâmetros, mais de uma combinação de valores podem representar a mesma resposta e não existe a garantia que os valores dos parâmetros encontrados serão representativos quando aplicados a outros processos (COETZEE, 2017; CUNHA *et al.*, 2016; SILVÉRIO *et al.*, 2014; ZHOU *et al.*, 2018).

Alguns trabalhos tentaram determinar experimentalmente os parâmetros necessários para a modelagem MED. Vu-Quoc, Zhang e Walton (2000) utilizando espelhos e uma câmera de alta velocidade mediram o coeficiente de restituição na soja, realizando testes simples de queda de várias alturas. González-Montellano *et al.* (2011) também utilizando uma câmera de alta velocidade determinaram valores do módulo de Young, coeficiente de restituição e o coeficiente de atrito estático para caroço de azeitona e grão de milho.

Para o processo de calibração algumas pesquisas utilizaram do método de tentativa e erro, porém torna-se difícil saber quantas tentativas serão necessárias até que a resposta numérica seja semelhante ao resultado experimental (FRANKOWSKI e MORGENEYER, 2013; GRIMA e WYPYCH, 2011). Outros métodos mais sofisticados de calibração têm sido implementados para ajudar na determinação dos parâmetros de entrada. Alguns autores utilizaram da técnica do planejamento composto central (PCC) como uma orientação na determinação dos parâmetros numéricos (BRANDAO *et al.*, 2020; CUNHA *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2016; SILVÉRIO *et al.*, 2014). Já Zhou *et al.* (2018) desenvolveram uma rede neural para alcançar a melhor combinação dos parâmetros.

Ainda não existe um consenso de qual abordagem é a melhor. Segundo Coetze (2017) cada vez mais está sendo utilizada uma combinação entre as duas abordagens. A medição direta tem sido aplicada para determinação das propriedades do material (tamanho, densidade, razão de Poisson, módulo de cisalhamento e Young) e o método de calibração tem sido aplicado para os parâmetros de interação (coeficientes de restituição, atrito estático e atrito de rolamento).

Coeficiente de restituição

O coeficiente de restituição (e_p) determina a quantidade de energia que é conservada após a colisão entre partículas ou entre a partícula e uma superfície. Esse parâmetro apresenta o valor máximo de 1 para colisões perfeitamente elásticas (não ocorre dissipação de energia) e o valor mínimo de 0 para colisões perfeitamente inelásticas (dissipação total da energia) (MACHADO *et al.*, 2017). O coeficiente de restituição pode ser determinado pela razão entre as velocidades relativas posterior (v_1) e anterior (v_0) à colisão (Equação 2.30).

$$e_p = \frac{v_1}{v_0} \quad (2.30)$$

Alguns fatores como diâmetro e massa das partículas, a espessura da superfície de impacto e a velocidade de impacto podem influenciar nos valores do coeficiente de restituição. Pesquisas têm sido realizadas ao longo dos anos para verificar essas influências e encontrar as melhores formas de se determinar o coeficiente de restituição, seja por meio de experimentos ou por modelos matemáticos.

Marinack Jr., Musgrave e Higgs (2013) avaliaram o coeficiente de restituição de diversos materiais por meio da metodologia de queda livre. Segundo os autores, a depender da massa da partícula e da distância de soltura, a resistência do ar pode ser desprezada e a Equação 2.30 pode ser reescrita como função da razão da altura do rebote (h_1) pela altura inicial (h_0), conforme apresentado pela Equação 2.31. Os autores ressaltaram que cálculos envolvendo a velocidade da partícula resultaram em flutuações no resultado de até 20%, enquanto a utilização da altura, as variações foram menores que 1%.

$$e_p = \sqrt{\frac{h_1}{h_0}} \quad (2.31)$$

Sondergaard, Chaney e Brennen (1990) estudaram o impacto de esferas de vidro e de aço de diferentes diâmetros em superfícies de acrílico com várias espessuras. Eles verificaram que quanto maior a razão entre o diâmetro da partícula e a espessura da chapa, maior é a dissipação de energia. Resultados semelhantes foram encontrados por Müller *et al.* (2016), para colisões de esfera de aço em superfícies de vidro.

Hlostá *et al.* (2018) avaliaram o coeficiente de restituição de partículas de diferentes tamanhos, formas e densidades. A metodologia experimental, apresentada na Figura 2.9, consistiu na utilização de um pêndulo, onde a partícula A era solta de uma determinada posição colidindo com a partícula B, em repouso.

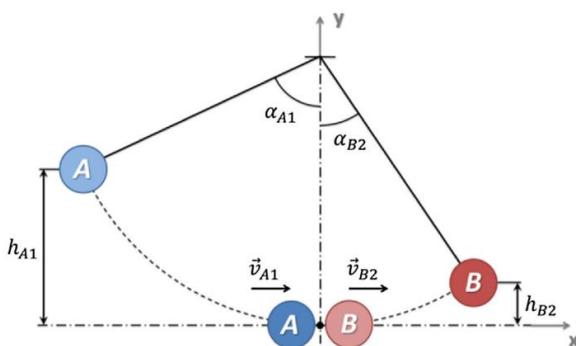


Figura 2.9: Esquema para medição do coeficiente de restituição entre duas partículas, utilizando a metodologia do pêndulo (HLOSTA *et al.*, 2018).

Os autores apresentaram três diferentes equacionamentos para o cálculo do coeficiente de restituição, com base na velocidade (v), na altura (h) e no ângulo (α). Segundo eles, ambas equações apresentaram resultados consistentes e similares, demonstrando que o método pode ser utilizado para a determinação do parâmetro.

$$e_p = \frac{v_{B2}}{v_{A1}} \quad (2.32)$$

$$e_p = \sqrt{\frac{h_B}{h_A}} \quad (2.33)$$

$$e_p = \sqrt{\frac{1 - \cos(\alpha_{A2} + \alpha_{B2})}{1 - \cos(\alpha_{A1})}} \quad (2.34)$$

Elskamp, Manuel e Ulrich (2017) e González-Montellano *et al.* (2012) também utilizaram com sucesso a metodologia do pêndulo para determinação do coeficiente de restituição para partículas de quartzo e grão de milho e azeitona, respectivamente.

Um modelo semi-empírico foi proposto por Zener (1941) para determinação do coeficiente de restituição, sendo função apenas do parâmetro inelástico. Este parâmetro depende das propriedades da partícula, da geometria e da velocidade de impacto. Mueller *et al.* (2015) também propuseram um modelo para determinação do coeficiente de restituição e quando comparado com o modelo de Zener (1941), os resultados foram similares.

Parâmetro inelástico:

$$\lambda = \left(\frac{\pi \rho_p}{\rho_c} \right)^{3/5} \frac{1}{4\sqrt{3}} \left(\frac{R}{L} \right)^2 \left[\frac{v^2 \rho_c (1 - v_c^2)}{E_c} \right]^{1/10} \left[1 + \frac{E_c (1 - v_p^2)}{E_p (1 - v_c^2)} \right]^{-2/5} \quad (2.35)$$

Zener (1941):

$$e_p = \frac{(1 - 0,84\lambda)}{(1 + 0,84\lambda)} \quad (2.36)$$

Mueller *et al.* (2015):

$$e_p = \exp \left(-\pi \frac{\lambda}{\sqrt{4 - \lambda^2}} \right) \quad (2.37)$$

sendo: λ o parâmetro inelástico que é função da densidade (ρ), da razão de Poisson (ν), do módulo de Young (E), da velocidade da partícula (v) do raio da partícula (R) e espessura da placa (L). Os subscritos p e c se referem à partícula e chapa, respectivamente.

Coeficiente de atrito estático

Ao longo dos anos, três leis do atrito foram desenvolvidas por Leonardo da Vinci, Guillaume Amontons e Charles Augustin Coulomb, são elas (MARGHITU, 2001; POPOV, 2010):

1. A força de atrito é proporcional a carga aplicada;
2. A força de atrito é independente da área de contato aparente;
3. Quando a rugosidade da superfície é quebrada e o movimento do corpo iniciado, a força de atrito é independente da velocidade de deslizamento.

A Figura 2.10 apresenta o diagrama de um corpo livre, onde são aplicadas as forças horizontal (F), gravitacional (W), normal (F_N) e de atrito (F_f).

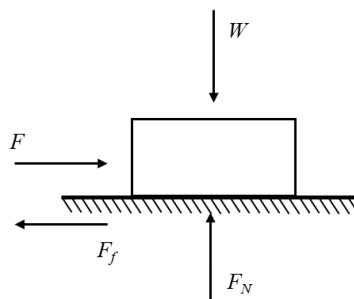


Figura 2.10: Diagrama de forças aplicado em um corpo livre.

Conforme a força horizontal (F) aumenta, a força de atrito (F_f) também aumenta na mesma proporção, mantendo o corpo em repouso ($F = F_f$). Quando F ultrapassa o valor máximo da força de atrito, o equilíbrio das forças é quebrado e o corpo começa a se deslocar. A máxima força de atrito pode ser expressa pela Equação 2.38:

$$F_f = \mu_s F_N \quad (2.38)$$

sendo: μ_s é o coeficiente de atrito estático, que depende das características dos materiais que estão em contato. Quando o corpo está em movimento o coeficiente de atrito que passa a predominar é o cinético (μ_k) e a Equação 2.38 passa a ser representada pela Equação 2.39.

$$F_f = \mu_k F_N \quad (2.39)$$

A força necessária para romper a rugosidade da superfície é superior à força para manter o corpo em movimento, nesse sentido o coeficiente de atrito estático é sempre maior que o cinético ($\mu_s > \mu_k$).

Os planos horizontal e inclinado apresentados na Figura 2.11 são duas metodologias simples e bastante empregadas para a determinação do coeficiente de atrito estático.

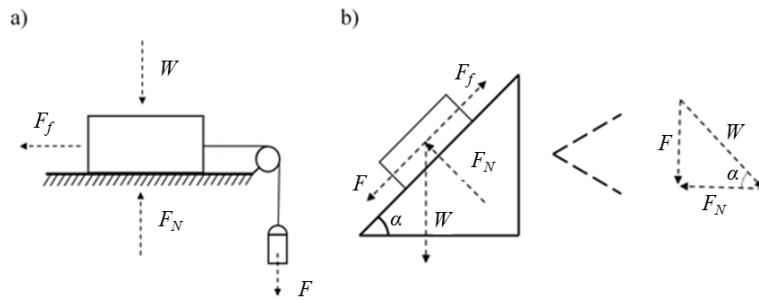


Figura 2.11: Diagrama de forças das metodologias utilizadas para a determinação do coeficiente de atrito estático: a) plano horizontal; b) plano inclinado.

Analizando a decomposição de forças e realizando manipulações algébricas, o coeficiente de atrito estático pode ser determinado como:

$$\text{Plano horizontal:} \quad \mu_s = \frac{F}{mg} \quad (2.40)$$

$$\text{Plano inclinado:} \quad \mu_s = \operatorname{tg} \alpha \quad (2.41)$$

Ishibashi, Perry e Agarwal (1994) utilizaram as metodologias do plano horizontal e inclinado para a medição dos coeficientes de atrito estático e cinético. Os autores encontraram resultados semelhantes para o coeficiente de atrito estático em ambas metodologias e o valor encontrado para o atrito estático foi superior ao atrito cinético. Em uma pesquisa similar, Ray Chaudhuri e Hutchinson (2005) destacaram que a aplicação do plano inclinado resultou em valores ligeiramente inferiores quando comparado com o plano horizontal. Segundo os autores a inclinação pode acarretar em uma distribuição irregular de forças, induzindo um movimento antecipado do corpo de prova. Os autores ainda afirmaram que o valor médio encontrado para coeficiente de atrito estático foi até 10% maior que o valor médio do atrito cinético.

Coeficiente de atrito de rolamento

Segundo a ASTM G194-08 (2013), o coeficiente de atrito de rolamento (μ_R) é proporção da força que resiste ao movimento de rolamento de uma partícula sobre uma determinada superfície (Figura 2.12).

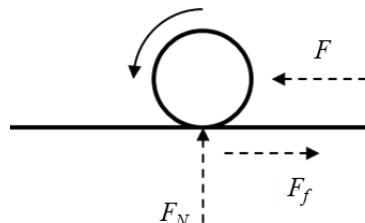


Figura 2.12: Balanço de forças realizado durante o movimento de rolamento.

Como existe uma força normal atuando sobre o contato entre a partícula e a superfície, a lei de Coulomb pode ser aplicada e a força de atrito ao rolamento pode ser expressa como:

$$F_f = \mu_R F_N \quad (2.42)$$

A depender da rugosidade da partícula e da superfície, o coeficiente de atrito de rolamento costuma ser duas a três ordens de grandeza menor que os coeficientes de atrito estático e cinético (BLAU, 1992; MATUTTIS e CHEN, 2014).

Ketterhagen, Bharadwaj e Hancock (2010) realizaram experiências para medir a resistência ao rolamento de partículas esféricas sobre superfícies metálicas e poliméricas. De acordo com o trabalho, a faixa de valores encontrada para o coeficiente foi de 0,004-0,013.

Estudos recentes sobre o coeficiente de atrito do rolamento se concentram principalmente em partículas esféricas únicas e regulares, é difícil obter valores exatos de μ_R para partículas não esféricas por estudo experimental. Wang *et al.* (2018) propuseram uma metodologia para determinar o coeficiente de atrito de rolamento de grãos de milho. O método combinava um experimento físico de medição de ângulo de repouso juntamente com simulações MED. Segundo os autores foi possível determinar uma relação linear entre o ângulo de repouso das partículas de milho com seu coeficiente de atrito rolamento. Os autores encontraram um valor de 0,0311 para resistência do rolamento do milho em uma placa de zinco.

2.3. Rede Neural

As redes neurais artificiais (*Artificial Neural Network* - ANN) são inspiradas no funcionamento do cérebro humano, onde as informações são transferidas neurônio por neurônio. Para os processamentos dos dados, os neurônios são divididos em camadas de entrada, ocultas e saída, conforme demonstrado na Figura 2.13 (KHAN, 2018).

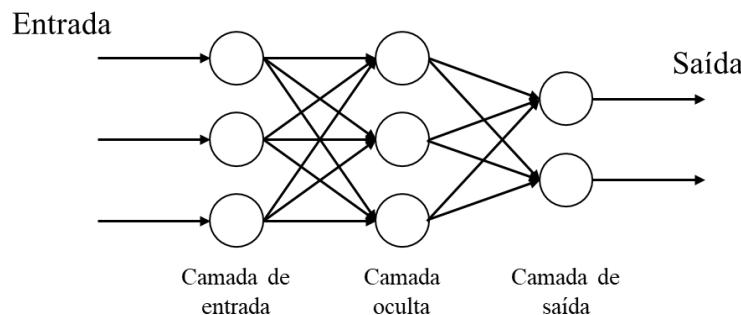


Figura 2.13: Rede neural com três camadas.

Dentre os tipos e aplicações das redes neurais, uma que se destaca é a rede neural convolucional (*Convolutional Neural Network* - CNN), muito utilizada no processamento e classificação de imagens. Essa rede é capaz de identificar padrões e reconhecer esses padrões em qualquer outra amostra.

Na CNN cada imagem é interpretada como uma matrix 2D, com valores de *pixels* variando de 0 a 255. Para uma imagem em preto e branco, é necessário somente uma matriz, onde os *pixels* correspondentes para o preto e o branco são 0 e 255, respectivamente e entre eles possui uma escala de cinzas. Já para uma imagem colorida em vermelho, verde e azul (*Red, Green e Blue* – RGB), são necessárias três matrizes, uma para a cor vermelha, outra para verde e outra para a azul (PEDRYCZ e CHEN, 2020).

A CNN é composta por uma camada de entrada, seguida de uma alternação de camadas de convolução e camadas de *pooling*, que serão responsáveis pela extração das características da imagem de entrada. Logo após a extração das características segue uma camada completamente conectada, que conecta todos os neurônios da camada anterior aos neurônios de saída, sendo então responsável pela classificação da imagem (VARGAS; CARVALHO; VASCONCELOS, 2016; PENHA, 2018). A Figura 2.14 representa uma arquitetura de uma CNN. Dependendo da combinação das camadas de convolução e *pooling* diversas arquiteturas podem ser montadas.

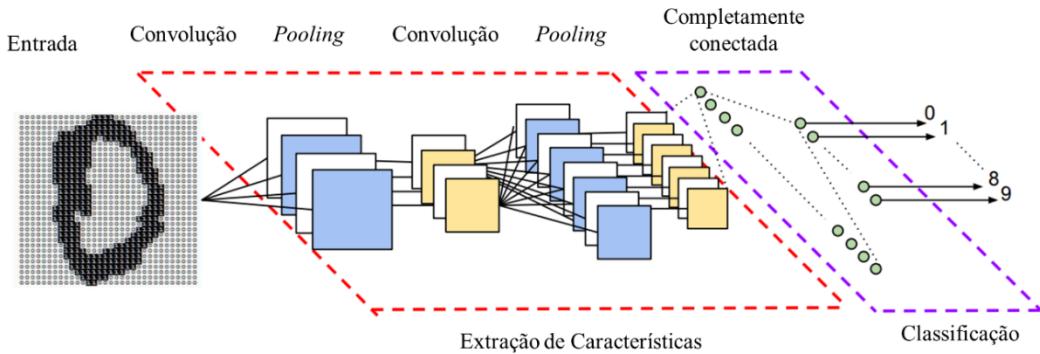


Figura 2.14: Exemplo de arquitetura de uma CNN (VARGAS; CARVALHO; VASCONCELOS, 2016).

Na camada convolucional, é aplicado a operação de convolução nas matrizes da imagem. Durante essa operação, um filtro de dimensões 3x3, 5x5 ou 7x7 varre toda a matriz de entrada e gera um mapa de características, esse mapa é responsável por reconhecer todos os padrões relativos à imagem, conforme apresentado na Figura 2.15

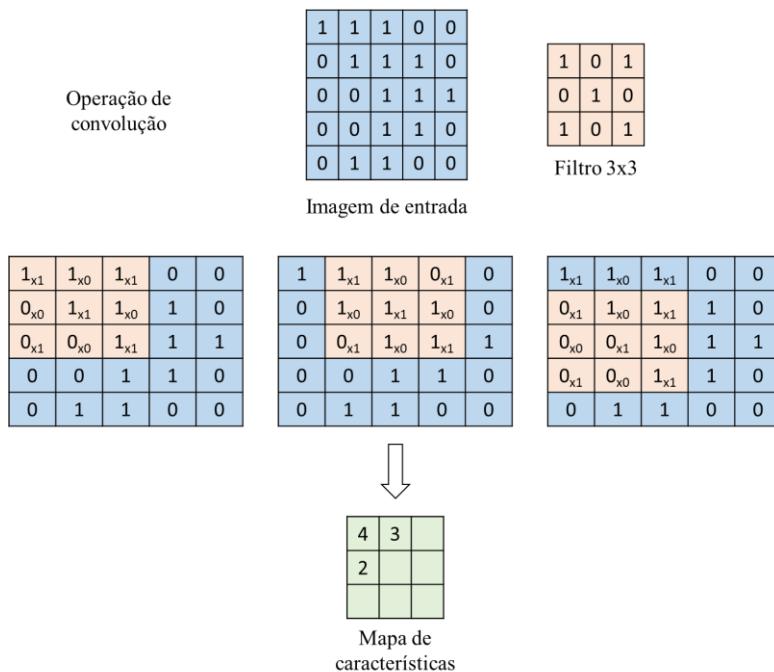


Figura 2.15: Operação de convolução (KHAN *et al.*, 2018).

A Equação 2.43 representa a fórmula do cálculo da convolução para geração do mapa de características. Um *pixel* $f(x, y)$ da imagem é multiplicado pelo respectivo elemento W_i do filtro e a soma dos produtos gera um novo *pixel* $g(x, y)$ (DE OLIVEIRA, 2018).

$$g(x, y) = \sum_{i=1}^k W_i f(x, y) \quad (2.43)$$

Outro tipo de operação utilizada na CNN é o *pooling*, ele reduz o tamanho da matriz ajudando a evitar sobreajustes e diminuindo a complexidade do modelo (SINGH e MANURE, 2020). As técnicas de *pooling* normalmente utilizadas são a máxima e a média (Figura 2.16).

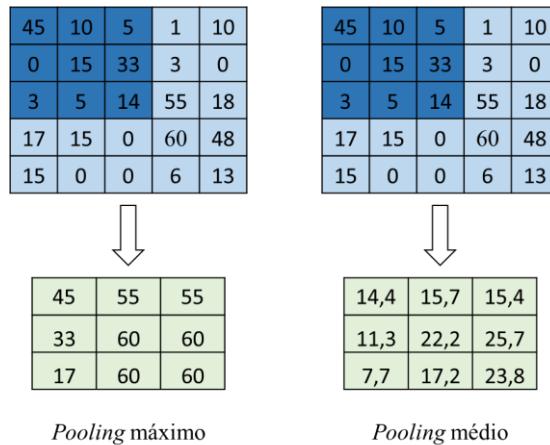


Figura 2.16: *Pooling* máximo e *pooling* médio (KHAN *et al.*, 2018).

As camadas de convolução e *pooling* extraem os recursos necessários para caracterizar a imagem de entrada e, após essas camadas, inicia-se o processo de classificação dos recursos na camada totalmente conectada, onde cada neurônio está conectado a todos os neurônios da camada anterior. No processo de classificação os dados passam por uma camada de achatamento (*flatten*), em que a matriz será ajustada em um vetor unidimensional (PEDRYCZ e CHEN, 2020).

O último passo de uma CNN é a aplicação da função softmax (Equação 2.44). Essa função é responsável por transformar as saídas da CNN em um vetor de probabilidade cuja a soma é 1 e, para isso, essa função utiliza o vetor unidimensional obtido na camada de achatamento (KHAN *et al.*, 2018).

$$\text{Softmax}(x_i) = \frac{e^{x_i}}{\sum_j e^{x_j}} \quad (2.44)$$

Chen *et al.* (2018) utilizaram de uma CNN para obter informações sobre a altura do empacotamento das partículas de uma tremonha a partir da taxa de descarga das partículas. Os

modelos CNN foram treinados e testados utilizando dados gerados em simulações MED e apresentaram uma precisão de aproximadamente 90%. Os autores ressaltam que a eficácia dos modelos reduziu quando aplicados em outras configurações de tremor.

Semelhante ao trabalho de Chen *et al.* (2018), Liao *et al.* (2021) também utilizaram de imagens obtidas por meio de simulações MED para desenvolver uma CNN, com objetivo de fazer previsões em relação ao número de partícula em função do tempo de descarga de uma tremor. Segundo os autores, o modelo proposto pela rede neural conseguiu economizar cerca de 75% do tempo gasto para realizar as simulações MED, se apresentando como uma alternativa viável para aplicação em previsões de equipamento em larga escala.

2.3.1. Métricas para avaliação do desempenho de uma CNN

Uma forma de se avaliar o desempenho de uma rede neural convolucional é por meio da matriz de confusão. Ela é uma medida efetiva do modelo utilizado para a classificação das imagens, apresentando uma relação entre a verdadeira classificação da imagem versus a classificação que foi predita pelo modelo (THARWAT, 2021). A Tabela 2.3 demonstra um exemplo de uma matriz de confusão em que existem quatro possíveis opções: o verdadeiro positivo (*VP*), falso positivo (*FP*), falso negativo (*FN*) e o verdadeiro negativo (*VN*).

Tabela 2.3: Exemplo de matriz de confusão.

		Valor predito	Positivo	Negativo
Valor real	Positivo	Verdadeiro positivo (<i>VP</i>)	Falso negativo (<i>FN</i>)	
	Negativo	Falso positivo (<i>FP</i>)	Verdadeiro negativo (<i>VN</i>)	

- **Verdadeiro positivo:** representa o número de observações que modelo previu como positivo em que a observação real era de fato positiva.
- **Falso negativo:** representa o número de observações que modelo previu como negativo em que a observação real era positiva.
- **Falso positivo:** representa o número de observações que modelo previu como positivo em que a observação real era negativa.
- **Verdadeiro negativo:** representa o número de observações que modelo previu como negativo em que a observação real era de fato negativa.

Basicamente, as classificações verdadeiro positivo e verdadeiro negativo indicam que o modelo conseguiu identificar de maneira correta as imagens que lhe foram propostas. Já o falso negativo e falso positivo indica que o modelo classificou as imagens de forma incorreta, ou seja, se a imagem era ‘positiva’ o modelo classificou ela como ‘negativa’ e se a imagem era ‘negativa’ o modelo classificou como ‘positiva’, respectivamente (SAMMUT e WEBB, 2010).

Por meio da matriz de confusão é possível obter as medidas de acurácia, precisão, sensibilidade e o *f-score* da CNN.

Acurácia

Representa o quanto o modelo conseguiu acertar das previsões possíveis, é a proporção de acertos do modelo, sendo calculado pela razão entre o somatório das previsões acertadas pela soma de todas as previsões (Equação 2.45).

$$Acurácia = \frac{VP + VN}{VP + FN + FP + VN} \quad (2.45)$$

Precisão

A precisão é determinada pelo número de observações que modelo previu corretamente como positivo (*VP*) dividido pelo número total de observações que modelo previu como positivo (*VP+FP*), sendo expresso pela Equação 2.46.

$$Precisão = \frac{VP}{VP + FP} \quad (2.46)$$

Sensibilidade

A sensibilidade é calculada pela Equação 2.47 e representa o número observações positivas classificadas corretamente pelo modelo (*VP*) dividido pelo total de observações que são positivas (*VP+FN*), ou seja, das imagens que são realmente positivas o quanto o modelo conseguiu prever corretamente.

$$Sensibilidade = \frac{VP}{TP + FN} \quad (2.47)$$

F-score

Por fim o *f-score* indica uma relação entre a precisão e a sensibilidade, sendo calculado pela média harmônica entre as medidas (Equação 2.48). Quanto maior o *f-score* melhor é o desempenho da classificação da rede neural.

$$F\text{-score} = 2 \frac{\text{Precisão} \cdot \text{Sensibilidade}}{\text{Precisão} + \text{Sensibilidade}} \quad (2.48)$$

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo descreve o passo a passo da metodologia utilizada no trabalho. Será apresentado a caracterização dos materiais utilizados, a unidade experimental, bem como as metodologias experimentais e numéricas. Todo o trabalho foi realizado no Laboratório de Granulação e no Laboratório de Processamento Paralelo da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU).

3.1. Caracterização dos materiais

Com o intuito de investigar os fenômenos inerentes a movimentação das partículas no interior do disco rotatório, foram utilizados dois materiais particulados, a soja e a esfera de vidro (Figura 3.1). Esses materiais foram escolhidos por apresentarem propriedades físicas distintas (densidade, esfericidade, coeficiente de atrito, ângulo de repouso), o que possibilitou a compreensão da influência dessas propriedades no escoamento granular dentro do disco rotatório.



Figura 3.1: Materiais particulados: a) soja e b) esfera de vidro.

Densidade da partícula

A densidade da partícula (ρ_p) foi determinada por picnometria líquida, sendo calculada pela Equação 3.1. Os testes foram realizados em triplicatas e utilizou-se como resultado a média das medidas.

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (3.1)$$

sendo m_p e V_p a massa e o volume da partícula respectivamente.

Porosidade do leito granular

Para determinação da porosidade do leito granular (ξ), uma proveta tarada de 50 mL foi preenchida de partículas e pesada (m_p). Com o volume total (V_T) e a massa específica foi possível determinar a porosidade do leito granular por meio da Equação 3.2.

$$\xi = 1 - \frac{m_p}{\rho_p V_T} \quad (3.2)$$

Dimensão das partículas

A dimensão das partículas foi determinada utilizando-se como base o diâmetro volumétrico (D_v), que representa o diâmetro de uma esfera de mesmo volume (V_p) que a partícula (Equação 3.3).

$$V_p = \frac{\pi}{6} D_v^3 \quad (3.3)$$

Esfericidade

A esfericidade (ϕ) das partículas de soja e de vidro foram calculadas por análise de imagens utilizando-se o *software* ImageJ®, seguindo a Equação 3.4 (PEÇANHA e MASSARANI, 1986)

$$\phi = \frac{d_i}{d_c} \quad (3.4)$$

sendo d_i e d_c os diâmetros de um círculo inscrito e circunscrito à partícula, respectivamente.

Ângulo de repouso

O ângulo de repouso estático e dinâmico são outros importantes parâmetros na caracterização dos materiais granulares, pois eles refletem a estabilidade do empacotamento granular. Quanto maior o ângulo de repouso de um material, maior a coesão e consequentemente mais difícil é a escoabilidade do material.

Para a determinação do ângulo de repouso estático, foi construído e utilizado o aparato experimental apresentado na Figura 3.2, semelhante ao proposto por Zhou *et al.* (2002).

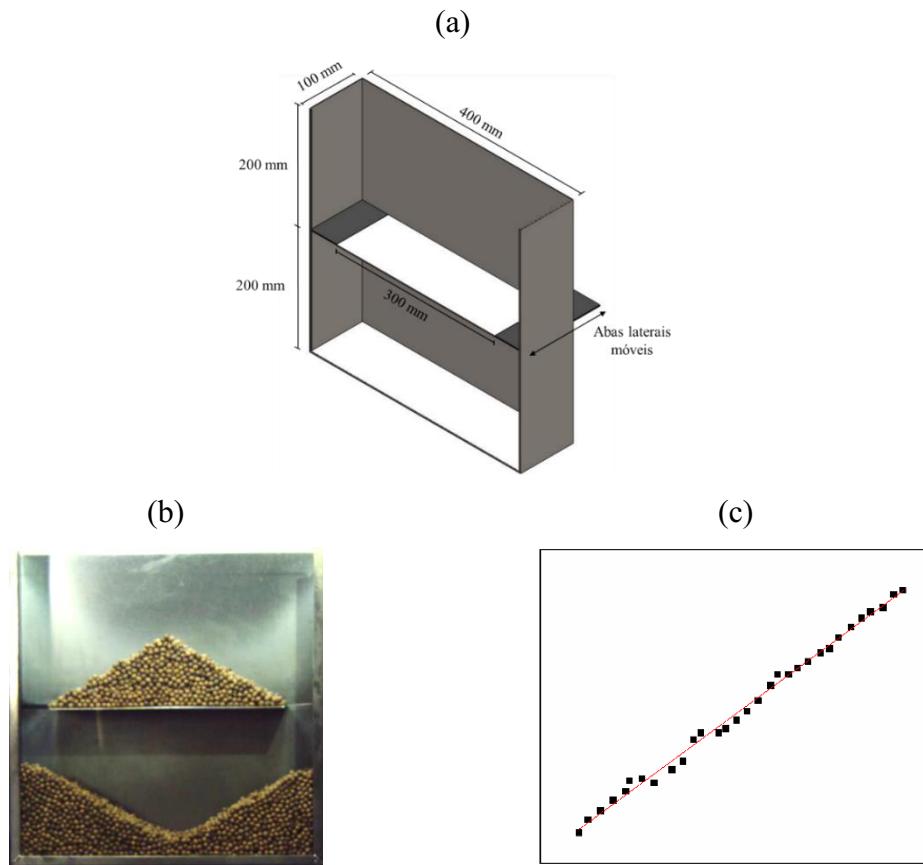


Figura 3.2: Determinação do ângulo de repouso: (a) Aparato experimental utilizado, (b) formação da pilha de partículas e (c) posição das partículas extraídas pelo *software* Tracker.

As partículas foram dispostas até a metade da parte superior do dispositivo (100 mm de altura). Com o material em repouso, as abas laterais foram removidas, possibilitando o escoamento das partículas. Quando a movimentação do material foi finalizada, ocorreu a formação de uma pilha de partículas na parte de superior (Figura 3.2b). Este experimento foi realizado em triplicata.

Para se medir o ângulo de repouso estático (Θ_E) utilizou-se o *software* livre Tracker (disponibilizado em: <https://physlets.org/tracker/>). Ele permite a seleção da posição das partículas e extraí-las na forma de uma tabela, com suas coordenadas cartesianas. Os pontos foram ajustados por uma reta e o ângulo de repouso foi obtido com base no coeficiente angular da equação (Figura 3.2c).

Para a determinação do ângulo de repouso dinâmico (Θ_D) utilizou-se de um tambor rotatório fabricado de aço inoxidável, com 10,8 cm de diâmetro e 10 cm de comprimento (Figura 3.3).

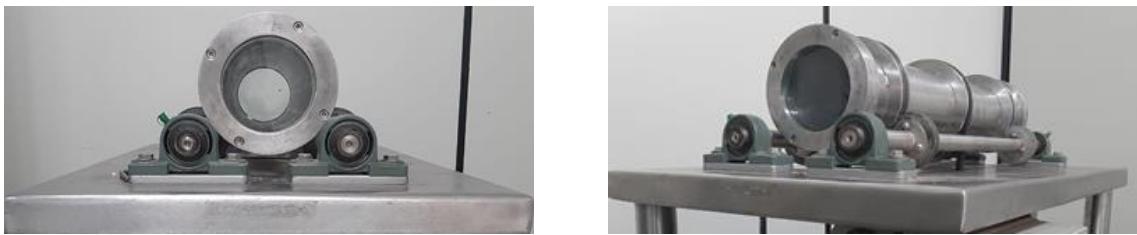


Figura 3.3: Tambor rotatório utilizado para medição do ângulo de repouso dinâmico.

As medidas foram realizadas no regime de rolamento, nos graus de preenchimento (f) de 25, 30, 35, 40, 45 e 50% e nas velocidades de rotação de 10, 20, 30, 40 e 50 rpm. O grau de preenchimento (f) foi determinado de acordo com a Equação 3.5, enquanto para a velocidade de rotação, utilizou-se de um tacômetro digital. Todas as medidas foram realizadas em triplicata.

$$m = \pi R^2 h (1 - \xi) \rho_p f \quad (3.5)$$

sendo: m , R , h , ξ , ρ_p , e f a massa da partícula introduzida no equipamento, o raio do equipamento, o comprimento do equipamento, a porosidade do leito granular, a densidade da partícula e o grau de preenchimento, respectivamente.

Coeficiente de atrito estático

Para determinação do coeficiente de atrito estático (μ_s), seguiu-se a metodologia do plano inclinado proposta pela ASTM G115 - 10. A Figura 3.4 ilustra o aparato experimental empregado.

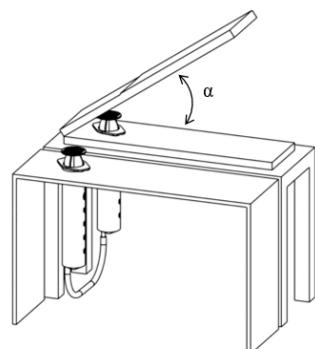


Figura 3.4: Aparato experimental para determinação do coeficiente de atrito estático.

O dispositivo utilizado possui um sistema hidráulico, composto por 2 seringas. Quando o pistão da seringa externa ao plano era pressionado ocorria simultaneamente a elevação gradativa do pistão da seringa interna ao plano de medição e a elevação, sem perturbações, do plano. O μ_s foi determinado a partir da tangente do ângulo (α) no qual, as partículas começaram a deslizar (Equação 2.41). A fim de evitar o rolamento das partículas, as partículas de soja foram coladas umas nas outras, o mesmo foi realizado para as esferas de vidro (BRANDAO *et al.*, 2020; CHEN *et al.*, 2015). Para determinação exata do ângulo de inclinação foi utilizado uma câmera de alta velocidade (marca Fastec, modelo IL5) com uma velocidade de gravação de 500 *frames/s*.

Para as esferas de vidro o coeficiente de atrito estático foi medido em superfícies de esferas de vidro, chapa de vidro e chapa de aço inoxidável. Já para as partículas de soja, a determinação do coeficiente foi realizada nas superfícies: partículas de soja e chapa de aço. As superfícies compostas por partículas, o aparato experimental foi revestido por uma monocamada de partículas de vidro e de soja, a fim de tentar assemelhar o comportamento *bulk* presente no interior do disco rotatório. Todo o procedimento foi realizado em quintuplicata.

Coeficiente de atrito de rolamento

O coeficiente de atrito de rolamento (μ_r) foi medido utilizando um dispositivo de soltura apoiado em uma superfície plana na qual, a partícula foi submetida ao movimento de rolamento (ASTM G194 - 08). Para garantir que a superfície fosse completamente plana e assim o perfeito rolamento das partículas, foi desenvolvido uma base de apoio com quatro pés em parafusos, permitindo o seu nivelamento.

As Figuras 3.5 e 3.6 demonstram o dispositivo de soltura e a base de apoio, utilizados para determinação do coeficiente de atrito de rolamento, respectivamente.

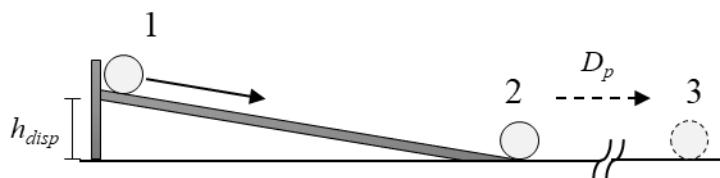


Figura 3.5: Dispositivo de soltura utilizado na medição do coeficiente de atrito de rolamento.



Figura 3.6: Base de apoio utilizada na medição do coeficiente de atrito de rolamento.

Inicialmente, a partícula foi solta na posição 1, percorrendo todo o dispositivo de soltura até atingir a superfície plana, posição 2. Foi medido a distância percorrida pela partícula após sair do dispositivo de lançamento (posição 2) até o momento em que cessava o movimento e entrava em repouso (posição 3). O coeficiente de atrito de rolamento (μ_R) foi obtido pela razão da altura do dispositivo (h_{disp}) pela distância percorrida pela partícula (D_p), Equação 3.6:

$$\mu_R = \frac{h_{disp}}{D_p} \quad (3.6)$$

Ketterhagen, Bharadwaj e Hancock (2010) utilizaram a mesma metodologia para determinação do coeficiente de atrito de rolamento, em diversas partículas esféricas. Os autores reportaram a necessidade de as partículas traçarem uma trajetória complemente retilínea, para a aferição correta da distância percorrida. Para eliminar esta limitação relatada pelos autores, o procedimento experimental foi gravado utilizando a câmera de alta velocidade. A câmera foi posicionada de forma a realizar as filmagens a partir da vista superior, capturando toda a extensão do experimento. Então, utilizando o *software* Tracker, foi possível acompanhar toda movimentação da partícula até o repouso, obtendo sua distância percorrida, sem a necessidade da trajetória ser retilínea. Essa adaptação na metodologia possibilitou a medição experimental do coeficiente para uma partícula irregular como a soja, o que até então, não foi encontrado na literatura. O coeficiente de atrito de rolamento foi mensurado em superfícies lisas de vidro e aço e todo o procedimento foi realizado em dez repetições.

3.2. Unidade experimental: Disco rotatório

O equipamento utilizado no trabalho experimental foi um disco rotatório (1), com 0,35 m de diâmetro e 0,20 m de borda, fabricado em aço inoxidável (Figura 3.7). Com o auxílio de um inclinômetro digital (Figura 3.8), foi possível alterar com precisão a inclinação do disco. O equipamento possuía um motor elétrico de 0,5 CV (2) e acoplado a ele existia um moto-redutor de velocidade (3). A velocidade de rotação foi controlada por um inversor de frequência (4) e medida por um tacômetro digital da marca Minimap, modelo MDT-2238A (Figura 3.9).

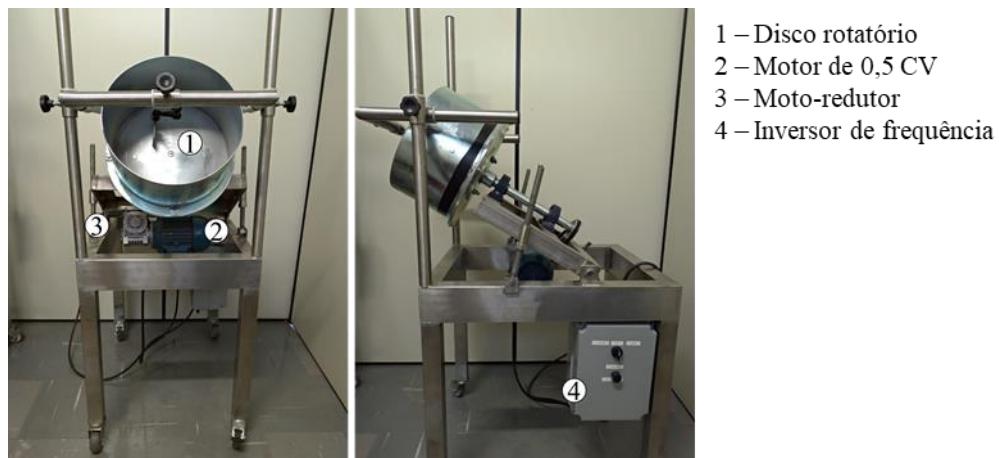


Figura 3.7: Unidade experimental do disco rotatório.



Figura 3.8: Inclinômetro digital.



Figura 3.9: Tacômetro digital

3.3. Determinação do *holdup* dos sólidos no disco rotatório

O *holdup* dos sólidos é uma medida que indica a capacidade do disco rotatório em reter o material granular no seu interior. Para se determinar o *holdup* dos sólidos, primeiramente, o disco rotatório foi completamente preenchido com partículas. O equipamento então foi ligado e as partículas começaram a ser expulsas pela borda, devido ao movimento de rotação. Quando observou-se que a vazão mássica de saída das partículas estava próxima de zero, o equipamento foi desligado e a massa que ficou retida no seu interior foi pesada. Esse procedimento foi realizado em triplicata para os ângulos de inclinação de 40, 50 e 60° e as velocidades de rotação de 10, 30 e 50 rpm.

Com objetivo de comparar o resultado entre as partículas (soja e vidro), o *holdup* dos sólidos (η) foi calculado pela Equação 3.7, em que m , ρ_p e V são a massa retida, a densidade de partícula e o volume do disco rotatório, respectivamente.

$$\eta = \frac{m}{\rho_p V} \quad (3.7)$$

Após as medições do *holdup* dos sólidos, foi realizada uma regressão não linear, com o intuito de quantificar a influência das condições operacionais (velocidade de rotação e ângulo de repouso) sobre o *holdup* dos sólidos.

3.4. Determinação dos regimes de escoamento

Para a determinação da transição dos regimes de escoamento, foram utilizadas duas metodologias. Na primeira metodologia, mais aplicada na literatura, a transição dos regimes foi caracterizada por meio de análise de imagens. A segunda metodologia consistiu em uma nova proposta para a identificação de cada um dos regimes de escoamento por meio da acústica do movimento das partículas. Os resultados obtidos por esta última metodologia foram comparados com os resultados da análise de imagens, visando verificar a viabilidade da técnica de análise por acústica.

3.4.1. Análise por imagens

Com o auxílio da câmera de alta velocidade (Fastec IL5) foram analisadas as transições dos seguintes regimes de escoamento: rolamento, cascateamento, catarateamento e

centrifugação (Figura 3.10). Para se determinar o momento em que ocorria a mudança do comportamento granular, a velocidade de rotação do disco rotatório foi aumentada a cada 5 rpm (0,52 rad/s), até atingir o regime de centrifugação. Destaca-se que, utilizou-se como critério para a transição catarateamento-centrifugação, a condição em que a primeira camada de partículas se aderia a parede do equipamento, formando um anel (RESENDE *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2016).

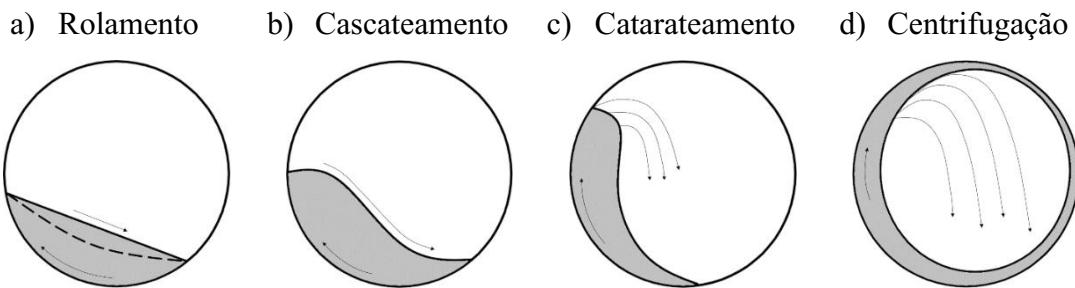


Figura 3.10: Os diferentes regimes de escoamento granular investigados neste trabalho
(Adaptado de SANTOS *et al.*, 2016).

As mudanças dos regimes foram investigadas para os ângulos de inclinação de 40, 50 e 60° e para os graus de preenchimento de 2, 5 e 8%.

A câmera de alta velocidade foi colocada no mesmo ângulo de inclinação que o disco rotatório, a fim de evitar efeitos de angulação na imagem.

A partir das imagens dos regimes de escoamento, foi desenvolvida uma rede neural convolucional (CNN) para a classificação dos regimes, contendo duas camadas convolucionais e duas camadas de máximo *pooling*. Foram utilizadas 200, 400, 900 e 300 imagens dos regimes de rolamento, cascateamento, catarateamento e centrifugação, respectivamente, sendo 80% destas imagens destinadas ao treinamento e 20% para a validação da rede neural. O código da rede foi escrito na linguagem Python e para implementação da CNN foi utilizado o TensorFlow (APÊNDICE A). O TensorFlow é uma biblioteca de código aberto desenvolvida pela empresa Google para computação numérica e aprendizado de máquina (<https://www.tensorflow.org/>). Ele já contém implementado uma série de modelos e algoritmos, auxiliando no treinamento e execução de redes neurais para o reconhecimento das imagens.

Para avaliação do desempenho da rede neural foi obtida a matriz de confusão, bem como suas métricas de avaliação: acurácia, precisão, sensibilidade e o *f-score*.

3.4.2. Análise por acústica

Para análise da acústica dos regimes de escoamento, utilizou-se de um microfone condensador DBX RTA para a captura do som. O microfone foi conectado em uma interface de áudio U-Phoria UM2 da marca Behringer, que realizou a conversão do sinal analógico (capturado pelo microfone) para um sinal digital, sendo reconhecido pelo computador. A Figura 3.11 apresenta o microfone condensador utilizado para a captura do som (a), a interface de áudio (b) e a disposição dos equipamentos no experimento (c).

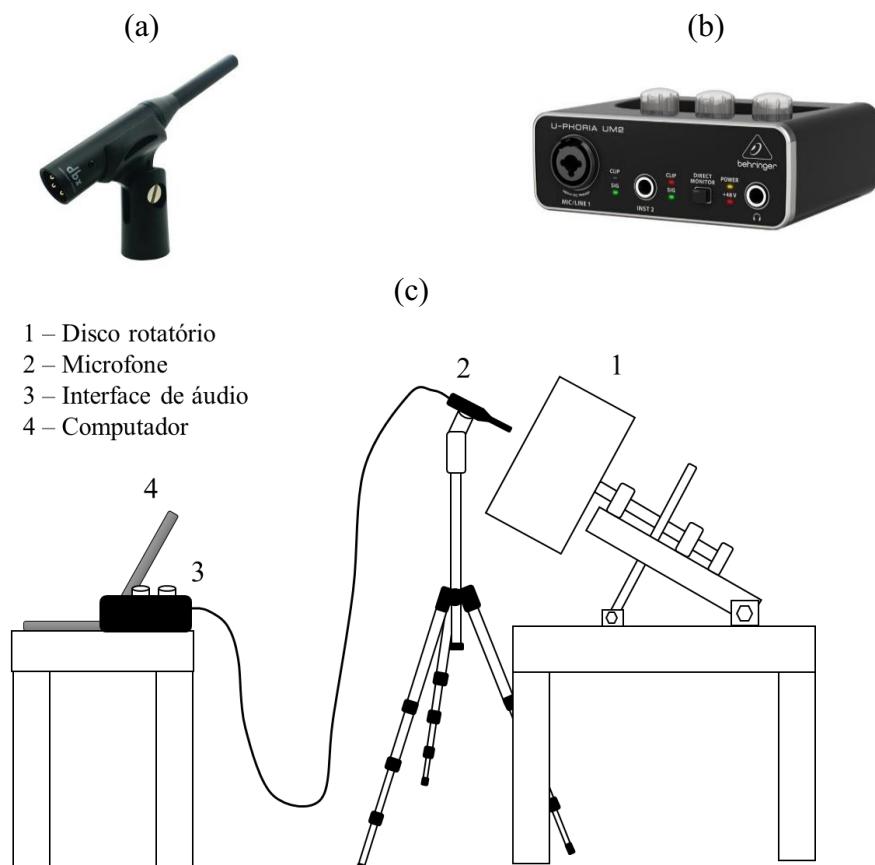


Figura 3.11: Análise da acústica dos regimes de escoamento. (a) microfone condensador DBX RTA, (b) interface de áudio U-Phoria UM2 e (c) disposições dos equipamentos no experimento.

O software REAPER (disponível em: <https://www.reaper.fm>) foi utilizado para a gravação do áudio. Os arquivos foram salvos a uma taxa de amostragem de 44,1 kHz e no formato .wav. A manipulação dos dados foi realizada por meio da linguagem Python.

Os áudios foram gravados para cada velocidade de rotação, variando em 2,5 rpm até atingir a centrifugação. O disco rotatório operou na inclinação de 40° e nos graus de preenchimento de 2, 5 e 8%.

Para a identificação dos regimes de escoamento foi calculado a raiz quadrada média da amplitude (RQM), conforme apresentado na Equação 3.8:

$$RQM = \sqrt{\frac{z_1 + z_2 + \dots + z_n}{n}} \quad (3.8)$$

sendo: z os valores de amplitude captados pelo microfone e n o número total de valores captados.

3.5. Determinação do ângulo de partida

No processo de granulação, se o leito granular atingir elevadas alturas de quedas pode resultar na quebra do aglomerado. O ângulo de partida (σ) é o ponto onde as partículas começam a se desprender da parede do equipamento. Essa variável foi determinada em função da velocidade de rotação, a partir das imagens obtidas pela transição dos regimes de escoamento. A Figura 3.12 ilustra a medição do ângulo de partida.

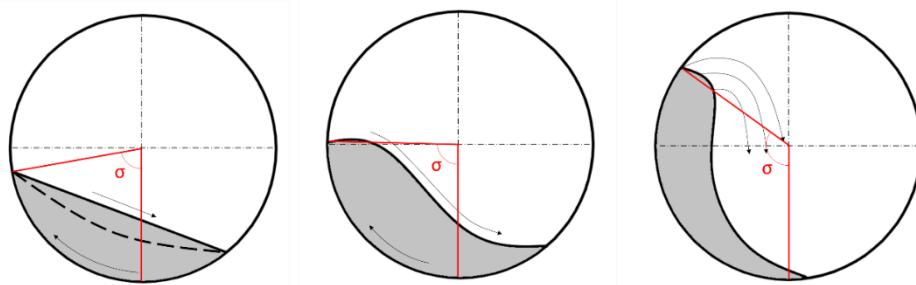


Figura 3.12: Esquema de medição do ângulo de partida.

3.6. Análise da velocidade das partículas na superfície do leito granular

Para determinação da velocidade das partículas presentes na superfície do leito granular, empregou-se uma metodologia semelhante a utilizada por Santos *et al.* (2015).

Uma linha de referência foi traçada no meio do leito granular e, com o auxílio do *software* Tracker e da câmera de alta velocidade, foi possível rastrear o movimento de cada partícula (Figura 3.13). A velocidade foi obtida por meio da variação da posição das partículas, imediatamente antes e após a linha de referência.

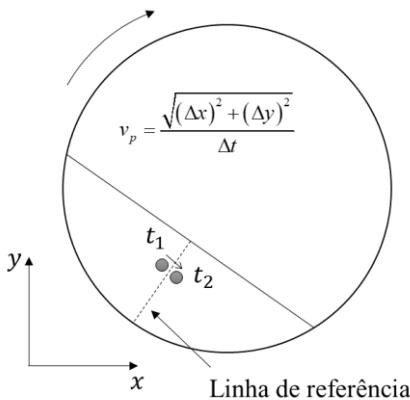


Figura 3.13: Esquema demonstrativo utilizado para a determinação das velocidades das partículas no leito granular (Adaptado de SANTOS *et al.*, 2015).

A linha de referência foi discretizada e normalizada (d_n) em vários pontos igualmente distribuídos e, em cada um deles, foram calculadas as velocidades de três partículas, utilizando-se a média dos resultados. As medidas das velocidades das partículas foram realizadas quando o disco rotatório operava no regime de rolamento.

3.7. Simulações utilizando o Métodos dos Elementos Discretos (MED)

Todas as simulações foram conduzidas no *software* EDEM® 3.0 e foi utilizado o modelo de contato de Hertz-Mindlin, esse modelo é o mais comumente utilizado na literatura por ser mais preciso e mais indicado para quando não existem interações coesas. Para garantir a estabilidade numérica, utilizou-se um passo no tempo 4×10^{-5} s, equivalente a 20% do passo de tempo de Rayleigh.

Considerando o tempo gasto para realizar as simulações, optou-se por utilizar o valor mínimo do módulo de cisalhamento, para as partículas de soja e de vidro. Nascimento (2018) verificou que o aumento de 10000 vezes no valor do módulo de cisalhamento, não acarretou em mudanças significativas nos resultados analisados. Os valores da razão de Poisson para as partículas estudadas, soja e vidro foram encontrados nos trabalhos de Boac, Casada e Maghirang (2010) e Makishima e Mackenzie (1975), respectivamente. As propriedades para a parede de aço inoxidável foram obtidas no trabalho de Boubeker *et al.* (2000). Para tentar representar o formato irregular da soja, utilizou-se do método de multiesferas, com um agrupamento de duas partículas.

A Tabela 3.1 estão presentes os valores utilizados nas condições de simulação.

Tabela 3.1: Condições de simulação aplicadas no software EDEM® 3.0.

Modelo	Hertz-Mindlin
Passo no tempo (s)	4×10^{-5}
Razão de Poisson (-)	
Soja	0,40
Vidro	0,22
Aço	0,30
Módulo de cisalhamento (Pa)	
Soja	1×10^6
Vidro	1×10^6
Aço	7×10^{10}

3.7.1. Análise de sensibilidade dos parâmetros numéricos MED

Com intuito de verificar a influência dos parâmetros MED (coeficiente de restituição, coeficiente de atrito estático e coeficiente de atrito de rolamento) no disco rotatório, utilizou-se o Planejamento Composto Central (PCC) fracionado com 2^{6-1} , 2×6 pontos axiais e uma réplica no ponto central, resultando em 45 simulações. Os níveis do planejamento estão apresentados na Tabela 3.2, os valores foram escolhidos para englobar o valor máximo e o mínimo dos parâmetros. As simulações foram conduzidas utilizando as propriedades das esferas de vidro.

Tabela 3.2: Planejamento composto central utilizado na análise de sensibilidade dos parâmetros numéricos MED em um disco rotatório.

Variável Codificada	e_{pp}	e_{pw}	μ_{Spp}	μ_{Spw}	μ_{Rpp}	μ_{Rpw}
$-\alpha$ (-1,78)	0,054	0,054	0,054	0,054	0,005	0,005
-1	0,250	0,250	0,250	0,250	0,025	0,025
0	0,500	0,500	0,500	0,500	0,050	0,050
+1	0,750	0,750	0,750	0,750	0,075	0,075
$+\alpha$ (+1,78)	0,946	0,946	0,946	0,946	0,095	0,095

sendo: e_{pp} , e_{pw} , μ_{Spp} , μ_{Spw} , μ_{Rpp} e μ_{Rpw} os coeficiente de restituição, atrito estático e atrito de rolamento, respectivamente. Os subscritos pp e pw indicam as interações partícula-partícula e partícula-parede, respectivamente.

O PCC foi aplicado para os graus de preenchimento de 2, 5 e 8%, com o disco rotatório operando no ângulo de inclinação de 40°. O mesmo PCC foi novamente aplicado e, neste caso, variou-se o ângulo de inclinação em 40, 50 e 60°, para o grau de preenchimento de 2%. A resposta analisada foi o número de contatos entre as partículas, uma vez que esta é uma importante variável na eficiência do processo de granulação. É importante ressaltar que, para possibilitar a comparação dos resultados, o número de contatos partícula-partícula foi dividido pelo número de partículas presente no sistema.

3.7.2. Análise da influência das condições operacionais do disco rotatório

Um novo PCC foi aplicado para analisar a influência das condições operacionais do disco rotatório (grau de preenchimento, ângulo de inclinação e velocidade de rotação) no número de contatos entre as partículas. O PCC consistiu em um 2^3 , com 2×3 pontos axiais e 5 repetições no ponto central, resultando em 19 simulações. O objetivo foi verificar quais dessas condições operacionais tendem a beneficiar ou prejudicar o contato entre as partículas. Os valores utilizados são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Planejamento composto central utilizado na análise da influência das condições operacionais no número de contato entre as partículas.

Variável Codificada	GP (%)	AI (°)	VR (RPM)
- α (-1,47)	0,59	35,29	5,29
-1	2,00	40,00	10,00
0	5,00	50,00	20,00
+1	8,00	60,00	30,00
+ α (+1,47)	9,41	64,71	34,71

sendo: GP , AI e VR o grau de preenchimento, o ângulo de inclinação e a velocidade de rotação, respectivamente.

3.7.3. Simulação dos regimes de escoamento

Os regimes de escoamento também foram investigados numericamente. O objetivo foi analisar se o MED conseguia reproduzir o comportamento granular observado experimentalmente.

Os valores utilizados de coeficiente de restituição para as partículas de soja e de vidro foram obtidos nos trabalhos de Boac, Casada e Maghirang (2010) e Branda *et al.* (2020),

respectivamente e são apresentados na Tabela 3.4. Já para os coeficientes de atrito estático e de rolamento utilizou-se os resultados obtidos das medidas experimentais realizadas neste trabalho.

Tabela 3.4: Valores de coeficiente de restituição utilizados nas simulações MED.

Partícula	e_{pp}	e_{pw}
Vidro	0,90	0,69
Soja	0,67	0,48

Para verificar se os valores dos parâmetros MED utilizados eram adequados, os resultados numéricos foram confrontados tanto quantitativamente, quanto qualitativamente com os resultados experimentais. Para análise quantitativa a resposta utilizada para comparação foi o ângulo de partida e para análise qualitativa, comparou-se as imagens dos regimes de escoamento.

3.7.4. Análise das camadas ativas e passivas no regime de rolamento

Após a verificação dos parâmetros MED, analisou-se as camadas ativas e passivas, para as partículas de vidro, no regime de rolamento. Devido a inclinação do disco rotatório, essas regiões são encontradas na parte interna do leito granular. Portanto, para realizar as medidas das velocidades das partículas, foi necessário realizar um corte transversal, paralelo a base do disco rotatório, conforme demonstrado na Figura 3.14.

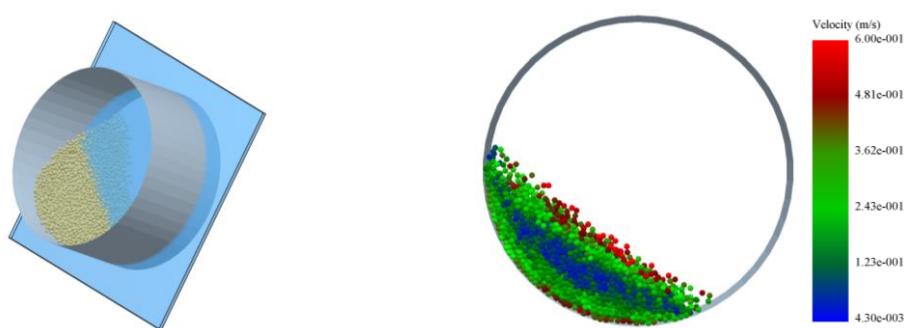


Figura 3.14: Representação das camadas ativas e passivas na simulação MED.

A metodologia utilizada, para determinação da velocidade das partículas, foi semelhante à descrita na Seção 3.6, onde uma linha de referência foi traçada no meio do leito granular e discretizada em pontos igualmente distribuídos. Em cada um dos pontos foi determinada a velocidade de cinco partículas diferentes e o resultado utilizado foi a média das medidas.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados experimentais da caracterização da esfera de vidro e da partícula de soja, do *holdup* dos sólidos, da transição dos regimes de escoamento pela análise de imagem e análise da acústica e da velocidade das partículas no disco rotatório operando no regime de rolamento. Também serão apresentados e discutidos os resultados referentes as simulações numéricas, como a análise de sensibilidade dos parâmetros MED e das condições operacionais no número de contato partícula-partícula, dos regimes de escoamento numéricos e das camadas ativas e passiva do regime de rolamento.

4.1. Caracterização dos materiais

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores medidos de algumas propriedades físicas e de escoamento desses materiais, sendo: D_v , ρ_p , ϕ , ξ e Θ_E o diâmetro volumétrico, a densidade da partícula, a esfericidade, a porosidade do leito e o ângulo de repouso estático, respectivamente.

Tabela 4.1: Propriedades físicas e de escoamento dos materiais utilizados.

Material	Soja	Vidro
D_v [mm]	$6,53 \pm 0,02$	$6,35 \pm 0,01$
ρ_p [kg/m^3]	1190 ± 32	2455 ± 24
ϕ [-]	$0,86 \pm 0,03$	$0,99 \pm 0,01$
ξ [-]	$0,36 \pm 0,03$	$0,37 \pm 0,01$
Θ_E [$^\circ$]	$29,55 \pm 1,00$	$24,20 \pm 1,22$

Pode-se observar que a soja apresenta esfericidade menor que da esfera de vidro. De acordo com Dubé *et al.* (2013) e Santos *et al.* (2016), partículas irregulares tendem apresentar um empacotamento granular mais estável e, consequentemente, seu ângulo de repouso estático é maior do que o das partículas esféricas, conforme mostrado na Tabela

4.1. Resultado semelhante é encontrado para o ângulo de repouso dinâmico, conforme demonstrado pela Figura 4.1, onde observa-se que a partícula de soja (Figura 4.1a) apresentou valores superiores que a esfera de vidro (Figura 4.1b). Percebe-se ainda que, o aumento do grau de preenchimento (Equação 3.5) e também da velocidade de rotação contribuíram para o aumento do ângulo de repouso dinâmico.

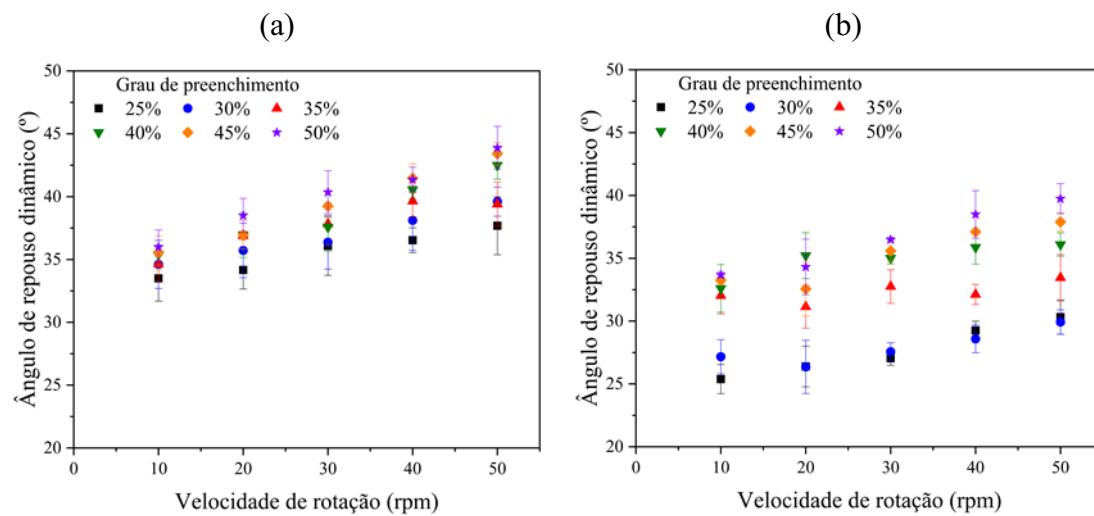


Figura 4.1: Ângulo de repouso dinâmico: (a) partícula de soja e (b) esfera de vidro.

Santos *et al.* (2016) avaliaram o ângulo de repouso dinâmico para diferentes tipos de materiais, incluindo soja e esferas de vidro. Os autores verificaram que partículas que apresentavam menor esfericidade e o aumento da velocidade de rotação e do grau de preenchimento intensificaram o ângulo de repouso dinâmico. Para uma faixa de grau de preenchimento de 20-50% e velocidade de rotação de 6,87-10 rpm, Santos *et al.* (2016) encontraram valores de ângulo de repouso dinâmico de aproximadamente 30-35° para partículas de soja e de 27,5-32,5° para as esferas de vidro, resultados próximos ao observado neste trabalho. Conclusões semelhantes também podem ser encontradas no trabalho de Resende *et al.* (2017), que analisaram o ângulo de repouso dinâmico para grãos de café verde e café torrado.

Em relação as propriedades friccionais, os resultados dos coeficientes de atrito estático (μ_s) e de rolamento (μ_r), para cada superfície analisada, são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Valores dos coeficientes de atrito estático e de rolamento obtidos experimentalmente.

Superfície	μ_s		μ_r	
	Soja	Vidro	Soja	Vidro
Partículas de vidro	-	$0,62 \pm 0,04$	-	-
Partículas de soja	$0,57 \pm 0,04$	-	-	-
Chapa de vidro	-	$0,53 \pm 0,04$	$0,024 \pm 0,002$	$0,014 \pm 0,002$
Chapa de aço	$0,38 \pm 0,03$	$0,33 \pm 0,03$	$0,026 \pm 0,002$	$0,013 \pm 0,001$

Percebe-se que os valores encontrados de μ_r da soja foram superiores ao valor encontrado para a esfera de vidro, nas duas superfícies analisadas. O formato elipsoidal da soja, além de fazê-la percorrer diferentes trajetórias, inibiu o seu movimento de rolamento, resultando em uma distância percorrida inferior à da esfera de vidro.

A utilização de uma câmera de alta velocidade demonstrou ser uma adaptação adequada na metodologia de medição do μ_r , visto que, além de possibilitar acompanhar a trajetória das partículas, as medidas apresentaram baixos valores de coeficiente de variação, 7% para uma partícula esférica (vidro) e 8% para uma partícula irregular (soja).

4.2. Determinação *holdup* dos sólidos no disco rotatório

A Figura 4.2 apresenta os resultados do *holdup* dos sólidos no disco rotatório para as partículas de soja (Figura 4.2a) e vidro (Figura 4.2b), variando o ângulo de inclinação e a velocidade de rotação.

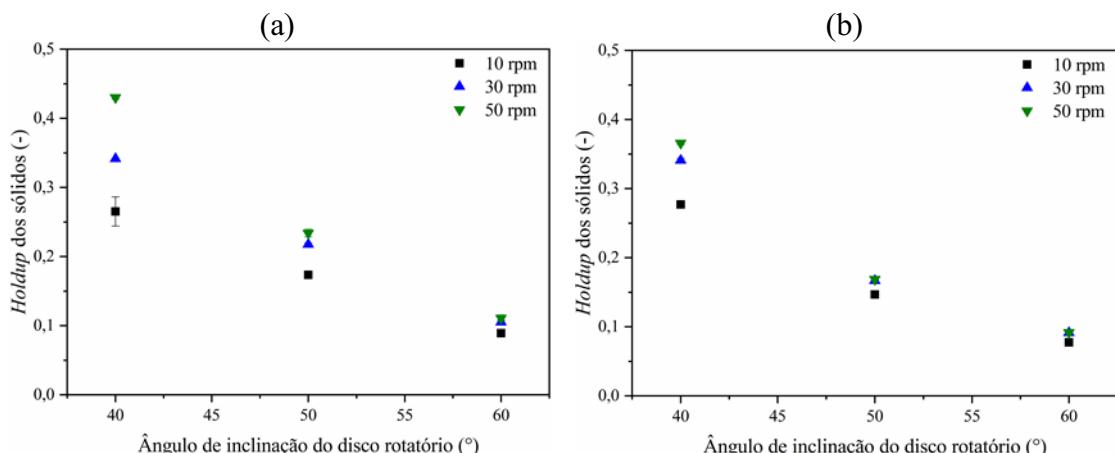


Figura 4.2: Comportamento do *holdup* dos sólidos para diferentes ângulos de inclinação e velocidades de rotação: (a) partículas de soja e (b) esferas de vidro.

Analizando a Figura 4.2, nota-se que a soja obteve um maior *holdup* dos sólidos em praticamente todos os pontos, quando comparada com as esferas de vidro. Ao relacionar essa informação com as propriedades das partículas apresentadas anteriormente, observa-se que, a soja apresenta valores superiores de ângulo de repouso e de atrito de rolamento, o que resulta em um leito mais rígido e compactado, impedindo que as partículas sejam ejetadas do equipamento.

Adicionalmente, é possível observar que a inclinação do disco e a velocidade de rotação possuem contribuições opostas no *holdup* dos sólidos. O aumento do ângulo de inclinação intensificou a descarga de sólidos, enquanto que para o aumento da velocidade de rotação, uma maior quantidade de partículas ficou retidas no interior do equipamento.

A Figura 4.3 ilustra uma representação da influência da inclinação e da velocidade de rotação no comportamento do leito granular.

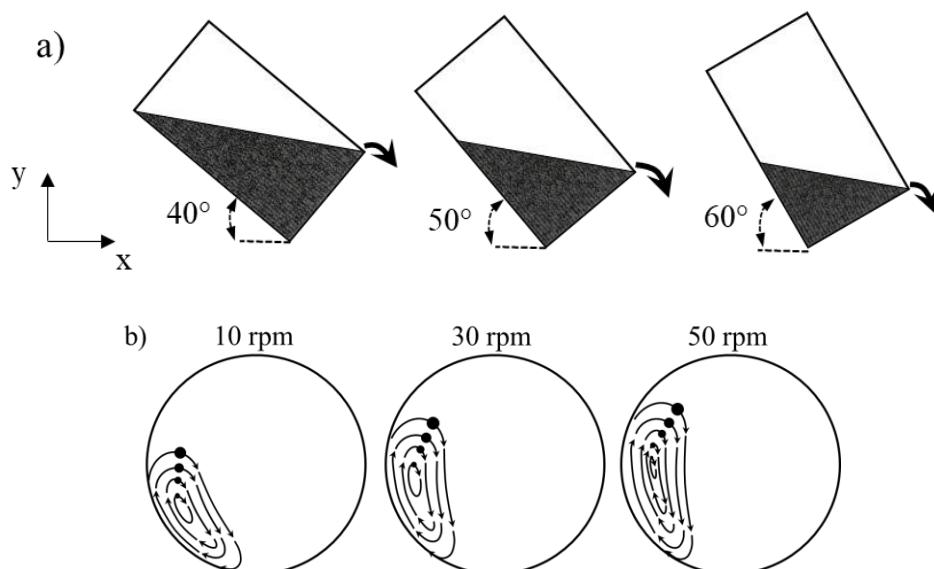


Figura 4.3: Representação dos efeitos do ângulo de inclinação (a) e da velocidade de rotação (b) no *holdup* dos sólidos do disco rotatório.

Com o aumento do ângulo de inclinação, o lado aberto do equipamento se torna mais alinhado horizontalmente, diminuindo o número de partículas dentro do disco rotatório. Por outro lado, o aumento da velocidade de rotação resulta em uma maior força centrífuga sobre o leito granular, pressionando as partículas contra a parede do dispositivo e evitando a sua descarga. Essas análises ficam mais evidentes quando se aplica uma técnica de regressão múltipla, para se obter as expressões de predição do *holdup* dos

sólidos da partícula de soja (η_{soja}) e da esfera de vidro (η_{vidro}). As Equações 4.1 e 4.2 foram ajustadas aos dados presentes na Figura 4.2, apresentando coeficiente de correlação (R^2) de 0,99 para ambas equações.

$$\eta_{soja} = 0,22 - 0,12x_1 + 0,04x_2 - 0,04x_1x_2 \quad (4.1)$$

$$\eta_{vidro} = 0,19 - 0,12x_1 - 0,02x_1^2 + 0,02x_2 - 0,02x_1x_2 \quad (4.2)$$

$$x_1 = \frac{AI - 50}{10} \quad x_2 = \frac{VR - 30}{20}$$

sendo: AI o ângulo de inclinação em °, e VR a velocidade de rotação em rpm.

A partir da análise de regressão, verifica-se que o ângulo de inclinação e a velocidade de rotação apresentam uma influência significativa sobre a resposta, quando avaliado para um nível de significância de 5%. Observa-se ainda que o ângulo de inclinação apresenta um efeito maior que a velocidade de rotação.

O *holdup* dos sólidos apresentou uma maior sensibilidade a variações de velocidade, quando o disco rotatório operou em menores ângulos de inclinação. Conforme o ângulo de inclinação diminui, o efeito da velocidade de rotação se torna mais pronunciado. No ângulo de inclinação de 40°, quando a velocidade de rotação passa de 10 rpm para 50 rpm, o *holdup* dos sólidos das partículas de vidro e da soja aumentaram 32,1% e 62,3%, respectivamente. Para o ângulo de 60°, o aumento do *holdup* dos sólidos (10 a 50 rpm) foi de apenas 18,4% para as esferas de vidro e 24,3% para a soja. Comportamento similar de *holdup* dos sólidos foram encontrados por Chadwick, Rough e Bridgwater (2005) para partículas de vidro com diâmetro de 400-500 μm.

4.3. Determinação dos regimes de escoamento por análise de imagens

Para a determinação dos regimes de escoamento, a velocidade de rotação do disco rotatório foi aumentada em intervalos de 5 rpm e, para cada velocidade, realizou-se a filmagem do leito granular, com auxílio da câmera de alta velocidade. As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam os regimes de escoamento nos graus de preenchimento de 2, 5 e 8% nos ângulos de inclinação de 40, 50 e 60° para as partículas de soja e vidro, respectivamente. Em cima de cada imagem está indicado a velocidade de rotação (em rpm) necessária para cada transição de regime.

Regime de Escoamento	2%	40°	5%	8%	2%	50°	5%	8%	2%	60°	5%	8%
Rolamento	-	-	-	-	10 rpm	-	-	-	10 rpm	10 rpm	10 rpm	10 rpm
Cascadeamento	10 rpm	10 rpm	10 rpm	25 rpm	10 rpm	10 rpm	30 rpm	25 rpm	20 rpm	30 rpm	25 rpm	20 rpm
Catarateamento	30 rpm	30 rpm	25 rpm	40 rpm	35 rpm	35 rpm	45 rpm	40 rpm	40 rpm	45 rpm	40 rpm	40 rpm
Centrifugação	55 rpm	50 rpm	45 rpm	80 rpm	65 rpm	60 rpm	125 rpm	100 rpm	85 rpm	125 rpm	100 rpm	85 rpm

Figura 4.4: Influência das condições operacionais nos regimes de escoamento das partículas de soja.

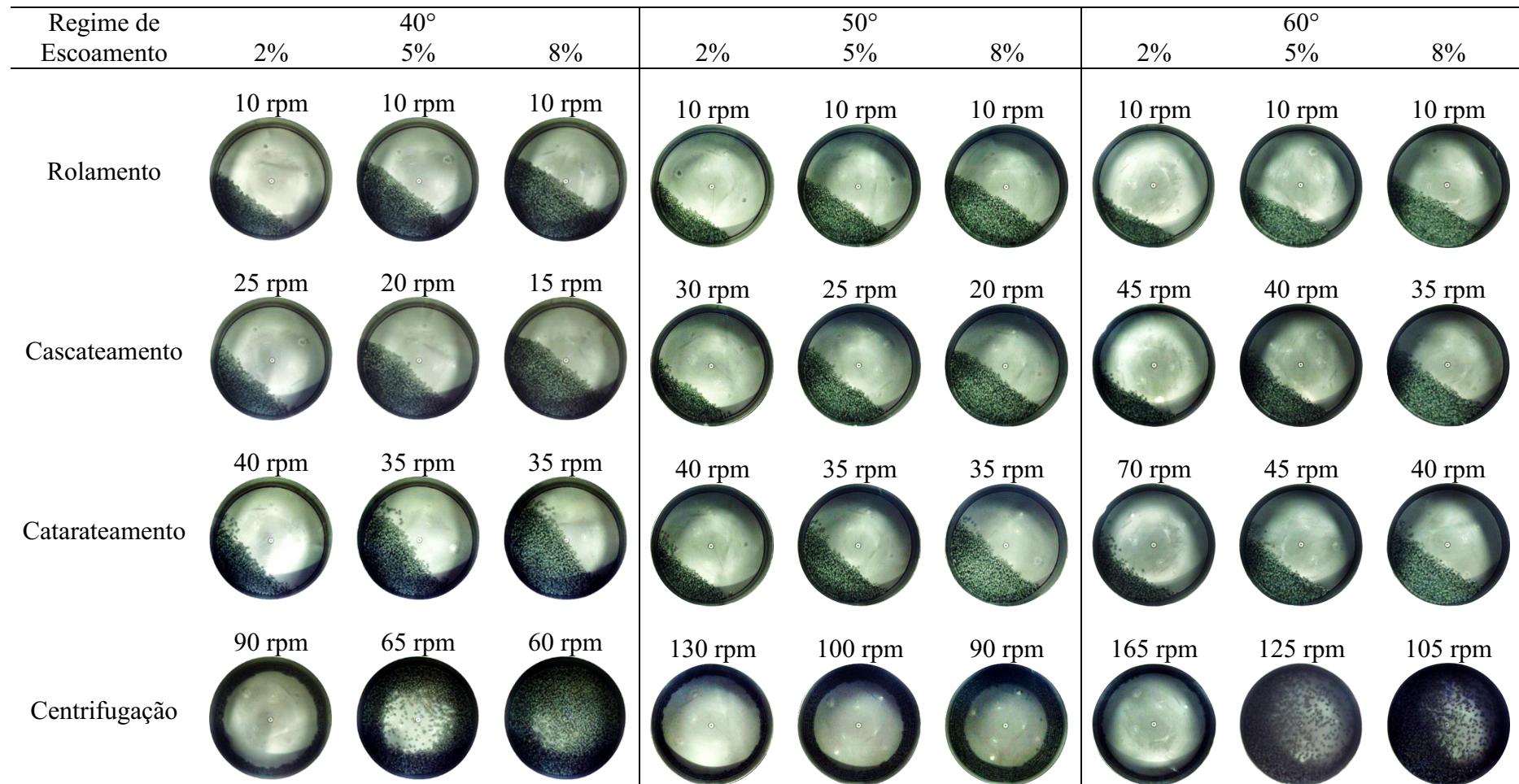


Figura 4.5: Influência das condições operacionais nos regimes de escoamento das esferas de vidro.

Pode-se observar que o grau de preenchimento e o ângulo de inclinação afetam a transição dos regimes de escoamento. Quando aumentou-se o número de partículas dentro do disco rotatório (2% a 8%), a visualização da transição dos regimes de escoamento ficaram mais evidentes e a velocidade de rotação necessária para a transição, diminuiu. Nota-se nas Figuras 4.4 e 4.5 que o ângulo de inclinação tem um efeito oposto ao grau de preenchimento. Quando a inclinação passou de 40° para 60°, uma maior velocidade de rotação foi necessária para atingir os mesmos regimes.

Em relação à influência das propriedades físicas dos materiais na transição dos regimes, para as mesmas condições de operação, a soja exigiu uma velocidade de rotação menor que as esferas vidro para transição. O formato irregular e as maiores forças de fricção da soja resultaram na formação de leito mais estável e compactado, permitindo uma transferência de momento mais eficiente da parede do disco para o leito granular e, consequentemente, facilitando a transição entre os regimes de escoamento.

Destaca-se que para a soja, em algumas condições estudadas, não foi observado a presença do regime de rolamento. Os regimes de rolamento e cascateamento são mais aplicados industrialmente, pois eles apresentam um maior contato entre as partículas, tornando o processo de granulação mais eficiente (CAPES, 1980; SALMAN, HOUNSLOW E SEVILLE, 2007; SPURLING; DAVIDSON; SCOTT, 2000).

Analizando a transição catarateamento-centrifugação, foi observado que, a depender da combinação do ângulo de inclinação e grau de preenchimento, primeiramente toda a base do equipamento era revestida de partículas e, com o aumento da velocidade de rotação, as partículas foram migrando para a borda do disco, resultando na centrifugação total. Em outras condições, principalmente para baixos graus de preenchimento e maiores ângulos de inclinação, a centrifugação total das partículas aconteceu de forma imediata. Portanto, a transição entre esses dois regimes foi considerada a partir do momento em que a primeira camada de partículas aderia a parede do disco rotatório.

Como apresentado na Tabela 2.2, algumas equações foram desenvolvidas ao longo dos anos com o intuito prever a velocidade crítica de centrifugação (ω_c). A Tabela 4.3 apresenta a média dos desvios de cada equação em relação as velocidades críticas encontradas neste trabalho.

Pode-se observar na Tabela 4.3 que, para as condições operacionais estudadas neste trabalho, as correlações na literatura não previram de forma adequada as velocidades críticas de rotação encontradas experimentalmente, uma vez que as médias dos desvios foram relativamente elevadas. Nota-se que, a equação que apresentou o menor desvio foi a da

mecânica clássica com 27,52%, enquanto as demais equações a média dos desvios foram superiores as 40%.

Tabela 4.3: Média dos desvios das equações para cálculo da velocidade crítica de centrifugação.

Autor	Modelo	Média dos Desvios (%)
Mecânica clássica	$\omega_c = 42,3 \sqrt{\frac{\operatorname{sen}(\theta)}{D}}$	27,41
Bazilevich (1960)	$\omega_c = 42,3 \sqrt{\frac{\operatorname{sen}(\theta) - \operatorname{tg}(\Theta) \cos(\theta)}{D}}$	44,03
Papadakis e Bombled (1961)	$\omega_c = 42,3 \sqrt{\frac{\operatorname{sen}(\theta) - \operatorname{sen}(\Theta)}{D}}$ $\omega_c = 16,75 \left[(V_0 - V_1) \left(\frac{k}{R^3} \right)^{1/2} \right]^{1/3}$ $k = \operatorname{sen}(\theta) - (2\pi\theta/360)\cos(\theta)$	52,83
Macavei (1965)	$V_0 = \left[(2 + 3^{1/2}) R g \operatorname{sen}(\theta) \right]^{1/2} \left(\frac{\sqrt{Rg}}{R^{3/2}} \right)^{1/4}$ $V_1 = \left[(2/3^{1/2}) R g \operatorname{sen}(\theta) \right]^{1/2} \left(\frac{g}{R} \right)^{1/4}$	43,84
Young e Mccamy (1967)	$\omega_c = 42,3 \frac{[1 - \cos(\theta)]}{\sqrt{D}}$	69,37

As equações da mecânica clássica, Macavei (1965) e Young e Mccamy (1967) dependem apenas do ângulo de inclinação (θ) e do diâmetro (D) do disco rotatório. As equações de Bazilevich (1960) e Papadakis e Bombled (1961), são influenciadas também pelo ângulo de repouso (Θ) do material granular. Porém, nota-se que nenhuma dessas correlações considera a influência do grau de preenchimento (f), que foi significativa na análise realizada.

Foi proposta no presente trabalho, uma modificação na equação de Papadakis e Bombled (1961), incorporando o grau de preenchimento na predição da velocidade crítica de rotação (Equação 4.3).

$$\omega_c = 42,3 \sqrt{\frac{\operatorname{sen}(\theta) - \operatorname{sen}(\Theta)}{D \sqrt{f}}} \quad (4.3)$$

A Equação 4.3 resultou em uma média dos desvios de 14,27%, em relação às velocidades críticas de rotação encontradas experimentalmente. Este valor é inferior aos erros encontrados

pelas correlações da literatura e, quando comparado com o modelo original de Papadakis e Bomblled, o desvio foi reduzido em 38,56%.

A Figura 4.6 apresenta uma comparação entre os resultados experimentais com a Equação 4.3 e o modelo de Papadakis e Bomblled (1961). A inserção do grau de preenchimento proporcionou um comportamento semelhante aos dados experimentais, onde o aumento do grau de preenchimento diminuiu a velocidade crítica de rotação.

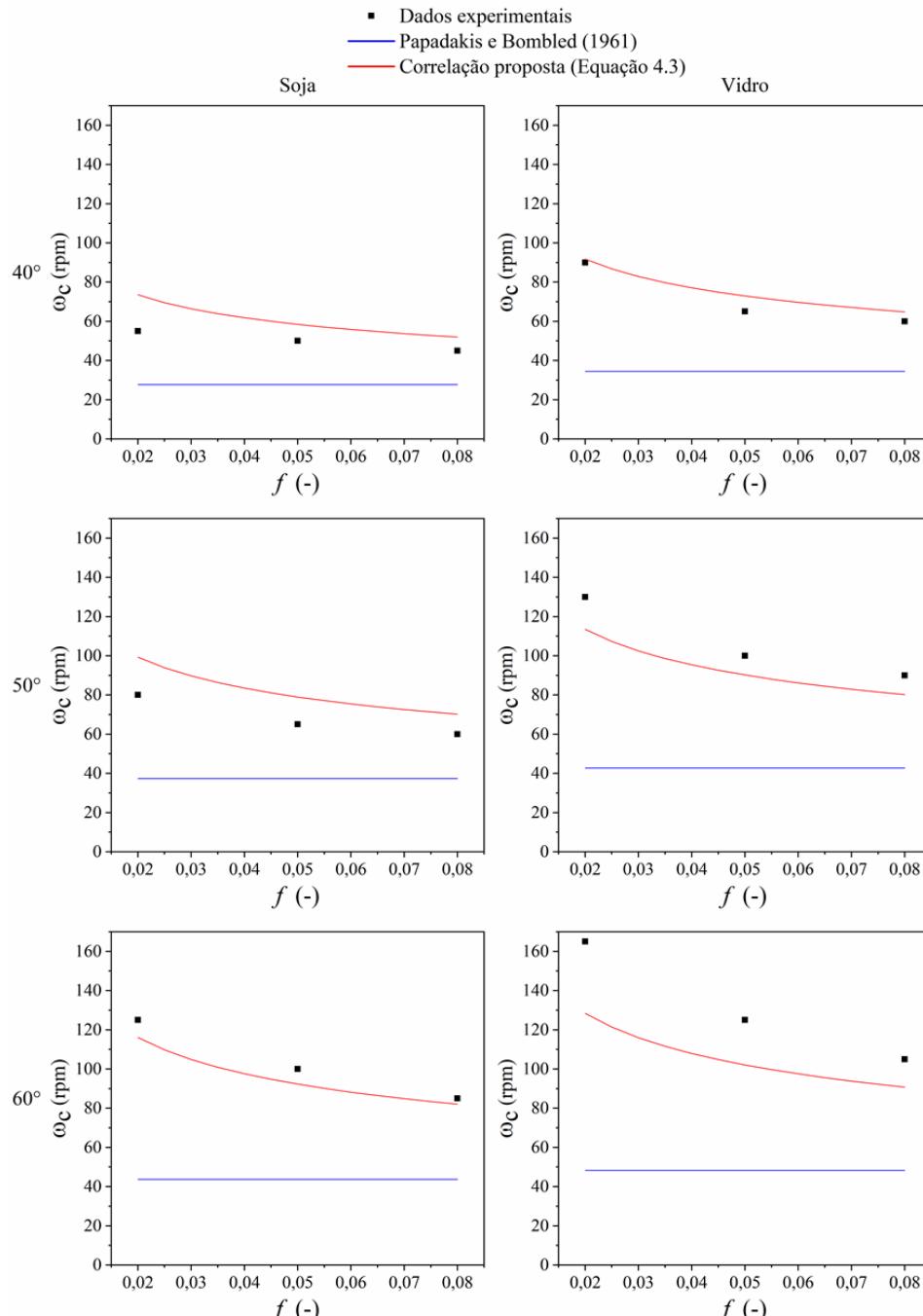


Figura 4.6: Comparativo da velocidade crítica de centrifugação encontrada experimentalmente com a correlação proposta (Equação 4.3) e com o modelo de Papadakis e Blomblled (1961).

As imagens dos regimes de escoamento obtidas pelas filmagens foram utilizadas para o treinamento e validação de uma rede neural convolucional (CNN). Para avaliar o desempenho da rede neural foi gerado uma matriz de confusão (Tabela 4.4), que permite visualizar os erros e acertos do modelo.

Tabela 4.4: Matriz de confusão da rede neural.

Preditos Real \ Predito	Rolamento	Cascadeamento	Catarateamento	Centrifugação
Rolamento	40	0	0	0
Cascadeamento	3	77	0	0
Catarateamento	0	0	176	4
Centrifugação	0	0	0	60

Observa-se pela Tabela 4.4 que a CNN conseguiu acertar a identificação de todas as imagens de rolamento e centrifugação que lhe foram propostas, ou seja, foram fornecidas 40 imagens do regime de rolamento e 60 imagens do regime de centrifugação e a CNN conseguiu classificá-las corretamente. Já para o regime de cascadeamento, das 80 imagens apresentadas a rede, ela acertou 77 e classificou 3 como rolamento, enquanto para o catarateamento das 180 imagens apresentadas ela errou apenas 4, classificando-as como centrifugação. Portanto, de 360 imagens que foram avaliadas, a rede neural classificou corretamente 353 imagens errando apenas 7, representando uma acurácia de aproximadamente 98%. Por meio da matriz de confusão, é possível obter outras avaliações a respeito do desempenho da rede neural, como as medidas de precisão, sensibilidade e *f-score*, apresentadas da Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Métricas para avaliação do desempenho da rede neural.

	Precisão (%)	Sensibilidade (%)	<i>F-score</i> (%)
Rolamento	93,0	100,0	96,4
Cascadeamento	100,0	96,3	98,1
Catarateamento	100,0	97,8	98,9
Centrifugação	93,8	100,0	96,8

Analizando a Tabela 4.5, nota-se que a rede neural apresentou uma precisão de 93% para o regime de rolamento, isso significa que a rede classificou 43 imagens como rolamento sendo que existiam somente 40 imagens desse regime. A mesma análise pode ser realizada para o regime de centrifugação cuja a rede apresentou uma precisão de 98,3%, ou seja, de todas as

imagens fornecidas para avaliação, a rede neural identificou 64 como centrifugação, sendo que existiam somente 60. Para análise de sensibilidade, verifica-se que das 80 imagens de cascateamento existentes a rede neural conseguiu classificar corretamente 77, apresentando uma sensibilidade de 96,3%, enquanto para o catarateamento a sensibilidade de 97,8% significa que ela acertou a identificação 176 imagens de 180 possíveis, deste regime.

A medida de *f-score* é a média harmônica das medidas de precisão e sensibilidade. O seu valor acima de 96% para todas as classificações (rolamento, cascateamento, catarateamento e centrifugação), juntamente com a acurácia de 98% comprova que, para os dados utilizado por este trabalho, que a rede neural proposta conseguiu classificar adequadamente as imagens dos regimes de escoamento que lhe foram fornecidas. Assim, a CNN demonstra ser uma excelente alternativa na caracterização e na determinação dos regimes de escoamento, diminuindo a subjetividade da identificação da transição dos regimes e auxiliando em futuras pesquisas. Além disso, a rede neural também pode ser aplicada na automação dos setores industriais, visto que é uma técnica de baixo custo e consegue fornecer informações em tempo real.

4.4. Determinação dos regimes de escoamento por análise acústica

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam a raiz quadrada média (RQM) da amplitude das amostras de áudio para as partículas de soja e vidro, respectivamente. Nota-se em todas as condições a presença de dois comportamentos (separados pela linha tracejada), um quando o RQM aumenta junto com a velocidade de rotação até atingir um pico e outro, quando começa a diminuir até um valor próximo de zero. Confrontando essas informações com as imagens dos regimes de escoamento, apresentadas nas Figura 4.4 e 4.5, percebe-se que essa mudança de comportamento é exatamente o momento em que ocorre a transição do regime de catarateamento para a centrifugação. Quando as partículas começam a aderir à parede do disco rotatório, a intensidade sonora diminui, o que resulta na diminuição do RQM.

É possível observar que em determinadas condições ocorre uma queda brusca da raiz quadrada média e, em outras, essa diminuição é gradativa. A primeira situação é devido a centrifugação total, ou seja, praticamente todas as partículas aderiram à parede do disco rotatório. Já a segunda situação, as partículas centrifugam ao passo que se aumenta a velocidade de rotação. Na literatura não existe um consenso de qual o critério correto para se determinar a transição catarateamento-centrifugação. Porém, pela técnica de análise por acústica, a centrifugação inicia no momento em que a primeira camada de partículas adere a parede do equipamento, critério adotado neste trabalho.

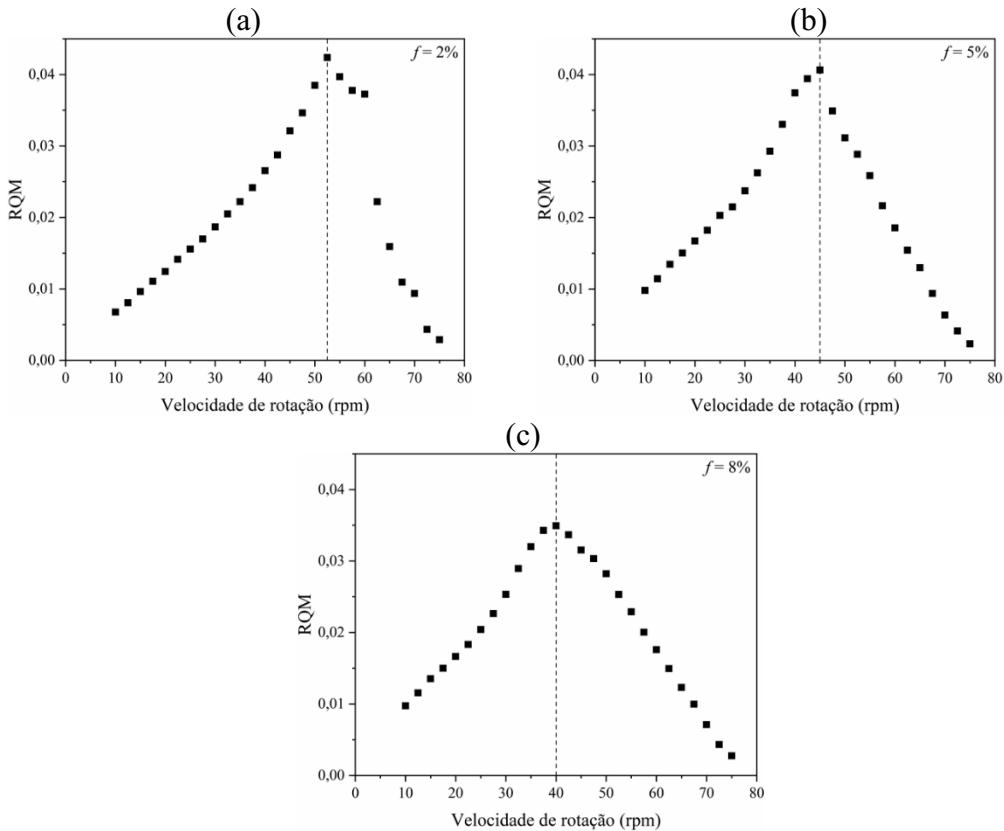


Figura 4.7: Valores da raiz quadrada média (RQM) da amplitude das partículas de soja em função da velocidade de rotação: a) 2%, b) 5% e c) 8%.

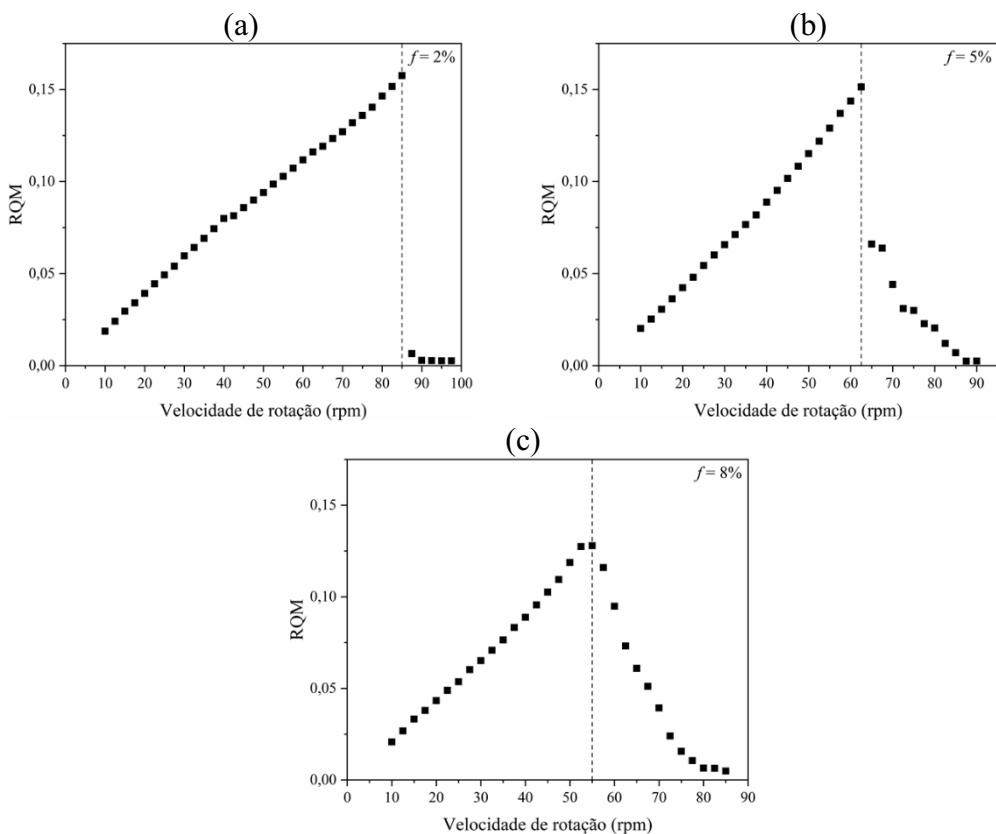


Figura 4.8: Valores da raiz quadrada média (RQM) da amplitude das esferas de vidro em função da velocidade de rotação: a) 2%, b) 5% e c) 8%.

Outro fenômeno observado, que ocorre somente para as partículas de soja, é uma mudança na intensidade dos valores de RQM a partir das velocidades de rotação de 40, 30 e 27,5 rpm para os graus de preenchimento 2% (Figura 4.7a), 5% (Figura 4.7b) e 8% (Figura 4.7c), respectivamente. Essa variação é devido a transição dos regimes cascateamento-catarateamento, onde as partículas se desprendem do leito granular e colidem com a parede do disco rotatório, aumentando a intensidade do som. Novamente, nota-se uma proximidade com os resultados encontrados pela técnica de análise por imagem (Figura 4.4). As velocidades de transição observadas foram de 30 rpm para o grau de preenchimento de 2%, 30 rpm para 5% e 25 rpm para 8%. Esse fenômeno não foi observado para as partículas de vidro, pois acredita-se que o som das colisões das partículas de vidro é tão elevado que não foi possível captar uma mudança de comportamento.

A Tabela 4.6 apresenta um comparativo entre as velocidades de rotação encontradas pela técnica de análise por imagem e pela técnica de análise por acústica, na transição dos regimes cascateamento-catarateamento, para as partículas de soja. Já a Tabela 4.7 apresenta o mesmo comparativo só que para a transição catarateamento-centrifugação, para as partículas de soja e vidro.

Tabela 4.6: Velocidades de rotação encontradas pelas técnicas de análise por imagem e análise por acústica, para a transição dos regimes de cascateamento-catarateamento, utilizando partículas de soja.

Cascateamento-catarateamento			
Grau de Preenchimento (%)	2	5	8
Análise por imagem (rpm)	30,00	30,00	25,00
Análise por acústica (rpm)	40,00	30,00	27,50
Desvio (%)	33,33	0,00	10,00

Tabela 4.7: Velocidades de rotação encontradas pelas técnicas de análise por imagem e análise por acústica, para a transição dos regimes de catarateamento-centrifugação, para as partículas de soja e de vidro.

Catarateamento-centrifugação						
Material particulado	Soja			Vidro		
	Grau de preenchimento (%)	2	5	8	2	5
Análise por imagem (rpm)	55,00	50,00	45,00	90,00	65,00	60,00
Análise por acústica (rpm)	52,50	47,50	42,50	87,50	65,00	57,50
Desvio (%)	4,55	5,00	5,56	2,78	0,00	4,17

Nota-se em ambas as tabelas, que os valores de velocidade de rotação encontrados pelas duas metodologias são relativamente próximos. Isso demonstra que a técnica de análise por

acústica aparenta ser uma excelente alternativa para a determinação da transição dos regimes de escoamento, principalmente para catarateamento-centrifugação, onde os desvios foram menores.

Uma característica interessante da técnica de análise por acústica e que se destaca em relação a análise por imagem é o fato de ser uma medida quantitativa, possibilitando a determinação exata da transição dos regimes de escoamento. Apesar da análise por imagem ser a técnica utilizada na literatura para a classificação dos regimes, ela é uma análise qualitativa e acaba sendo afetada pela subjetividade do avaliador. Acredita-se então, que a utilização da técnica análise por acústica, juntamente com a análise por imagem, pode trazer contribuições significativas para uma melhor determinação da transição dos regimes de escoamento. Um outro fator que torna a técnica por acústica viável é que, diferentemente do disco rotatório, vários equipamentos são fechados, não sendo possível a visualização do comportamento granular no seu interior. Nesse sentido a técnica é um método interessante para o controle operacional desses equipamentos.

4.5. Determinação do ângulo de partida

A Figura 4.9 apresenta os ângulos de partida (σ), para as partículas de soja e vidro, em função da velocidade de rotação, para diferentes condições operacionais (grau de preenchimento, ângulo de inclinação e velocidade de rotação).

No processo de granulação, o aumento da velocidade de rotação resulta em uma maior utilização da base do equipamento, além de aumentar o tempo de residência do material granular (CHADWICK e BRIDGWATER, 1997; PIETSCH, 1991). Analisando a Figura 4.9, observa-se que o aumento da velocidade de rotação também aumenta o ângulo de partida. Segundo Capes (1980), deve-se ter cuidado ao se trabalhar com elevadas velocidades de rotação, pois a depender de sua intensidade e da altura do leito granular, o disco rotatório pode operar em regime de catarateamento e as colisões das partículas podem levar a degradação do aglomerado formado.

Observa-se ainda que o ângulo de partida também sofre influência do grau de preenchimento, do ângulo de inclinação do equipamento e das propriedades físicas do material. O aumento do número de partículas no disco rotatório fez com que o leito granular atingisse maiores ângulos de partida. Comportamento oposto foi observado para a influência do ângulo de inclinação.

Em relação ao tipo de material, percebe-se que a partícula de soja apresentou maiores valores do ângulo de partida, quando comparado com as esferas vidro. Chadwick e Bridgwater (1997) perceberam que materiais que possuem maiores ângulo de repouso apresentaram um

ângulo de partida superior. Os autores ainda ressaltam que o ângulo de partida não sofreu alterações com a mudança do diâmetro do equipamento.

Destaca-se que a altura do leito granular está diretamente relacionada com os regimes de escoamento. A influência das condições operacionais no ângulo de partida foram as mesmas que atuaram na antecipação dos regimes de escoamento.

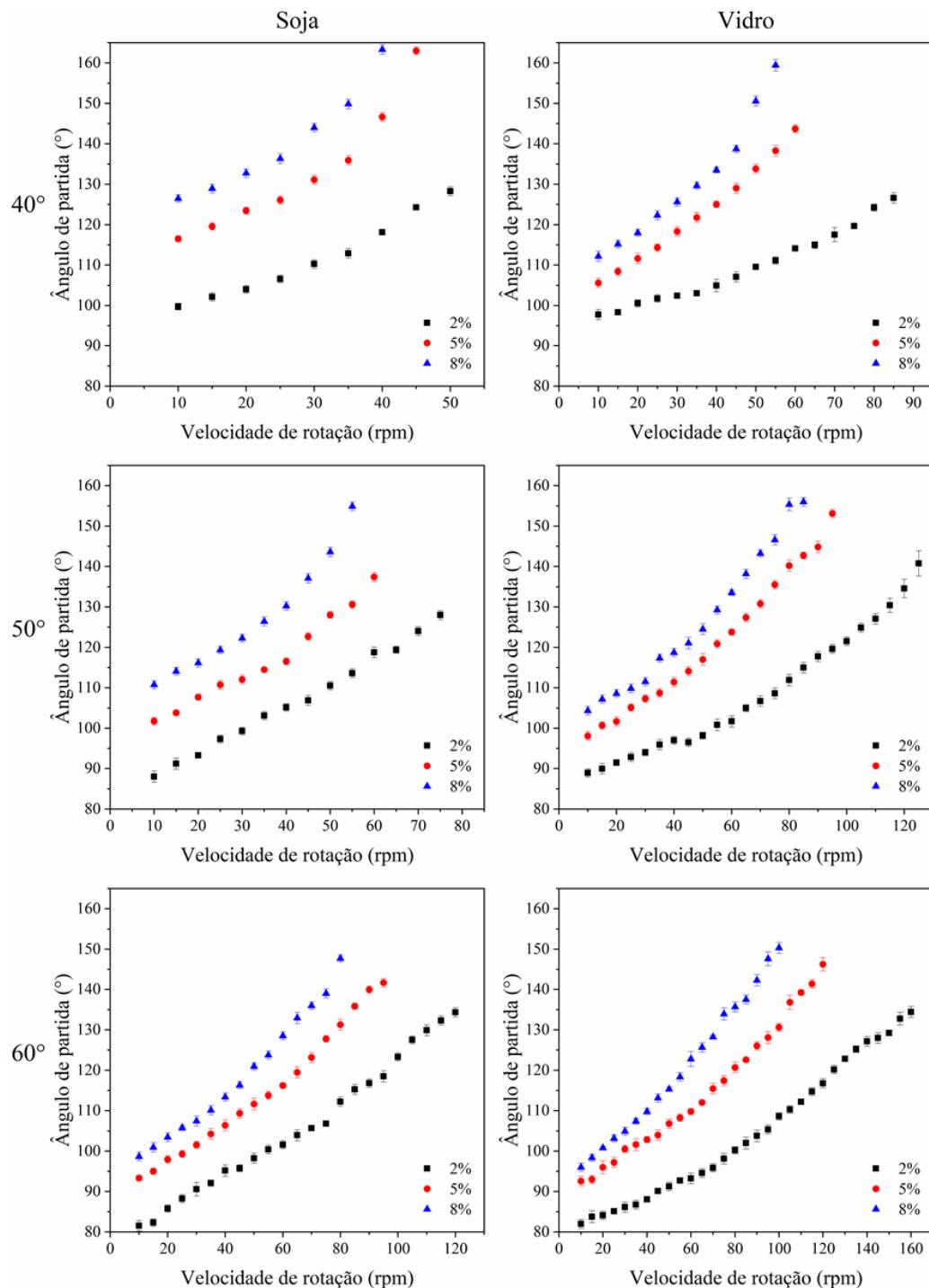


Figura 4.9: Determinação do ângulo de saída para o grau de preenchimento de 2, 5 e 8% sob diferentes condições de operação.

A influência das condições operacionais sobre o ângulo de partida (σ) fica mais evidente quando se aplica a técnica de regressão múltipla. As Equações 4.4 e 4.5 foram ajustadas aos dados presentes na Figura 4.9.

$$\begin{aligned}\sigma_{soja} = & 111,18 - 14,30x_1 - 1,73x_1^2 + 12,43x_2 + 1,38x_2^2 + 9,93x_3 - \\& - 4,13x_1x_2 - 3,61x_1x_2 + 1,78x_2x_3\end{aligned}\quad R^2 = 0,98 \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{vidro} = & 103,72 - 9,92x_1 - 0,60x_1^2 + 9,52x_2 + 1,56x_2^2 + 6,93x_3 - \\& - 0,82x_1x_2 - 1,49x_1x_2 + 2,36x_2x_3\end{aligned}\quad R^2 = 0,99 \quad (4.5)$$

$$x_1 = \frac{AI - 50}{10} \quad x_2 = \frac{GP - 5}{3} \quad x_3 = \frac{VR - 25}{15}$$

onde: AI é o ângulo de inclinação em °, GP o grau de preenchimento em %, e VR a velocidade de rotação em rpm.

Por meio da análise de regressão, percebe-se que todas as condições operacionais avaliadas apresentaram influência significativa sobre o ângulo de partida, quando avaliado para um nível de significância de 5%.

Destaca-se que os valores de coeficiente encontrados para o AI , GP e VR foram próximos, demonstrando que elas possuem influência semelhantes sobre o ângulo de partida.

A ângulo de inclinação apresenta uma contribuição negativa, ou seja, o seu aumento diminui o ângulo de partida, enquanto o aumento grau de preenchimento e a velocidade de rotação favoreceram o ângulo de partida.

Em comparação aos dois tipos de material, nota-se que as equações são similares e que a equação da soja (Equação 4.4) apresentou valores de coeficientes maiores que das esferas de vidro (Equação 4.5). Isso se deve pelo fato das partículas de soja apresentaram um ângulo de partida superior que o das esferas de vidro.

4.6. Determinação da velocidade das partículas na superfície do leito granular

A Figura 4.10 apresenta a velocidade das partículas de soja ao longo da superfície do leito granular, para o ângulo de inclinação de 60° e nos graus de preenchimento de 2 e 5% (regime

de rolamento). Destaca-se que o leito granular foi discretizado e normalizado (d_n) em várias posições, em que o 0 é a posição próxima a borda do disco rotatório e 1 é o ponto mais alto. A medida que d_n aumenta, as partículas se movimentam em uma maior altura no leito granular, fazendo-as adquirir uma maior dinâmica.

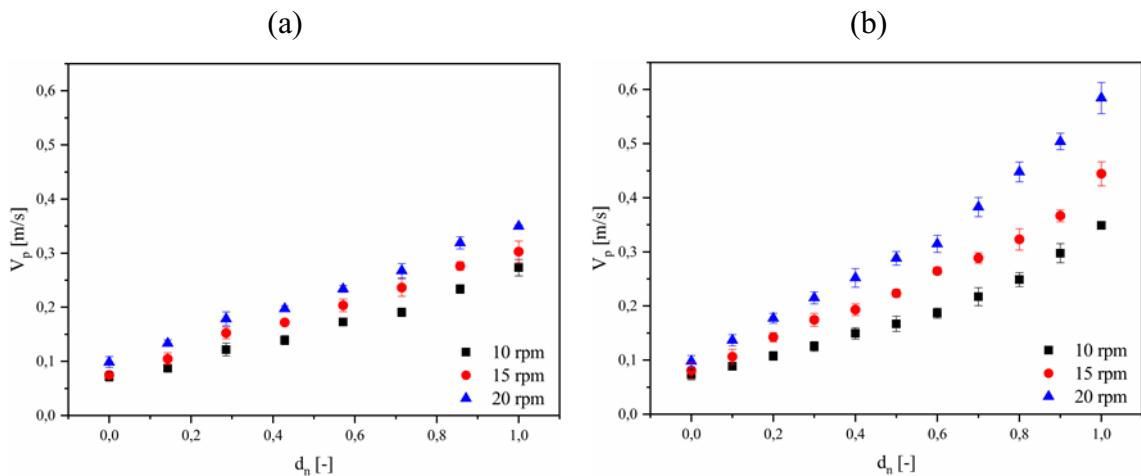


Figura 4.10: Velocidade das partículas de soja para o ângulo de inclinação de 60° : a) grau de preenchimento 2% e b) grau de preenchimento 5%.

É possível observar que a velocidade das partículas é influenciada tanto pela velocidade de rotação do disco rotatório quanto pelo grau de preenchimento e, este efeito, se torna mais pronunciado conforme d_n se aproxima de 1. Pela análise do ângulo de partida, realizado na Seção 4.5, o aumento da velocidade de rotação e do número de sólidos resulta em uma maior altura de queda do leito granular, aumentando a energia cinética das partículas. Para d_n próximo de zero, a velocidade das partículas foi semelhante para os dois graus de preenchimento (2 e 5%). Nesta posição as partículas não sofrem interferência da altura, sendo influenciada somente pela troca de momento entre a parede do disco rotatório e o leito granular.

A Figura 4.11 apresenta o mesmo comportamento, mas, agora, para esferas de vidro no grau de preenchimento de 2 e 5% e no ângulo de inclinação de 60° . Nota-se que a mesma influência da velocidade de rotação e do grau de preenchimento, anteriormente observadas para as partículas de soja, foram encontradas para as esferas de vidro.

Comparando a velocidade das duas partículas, destaca-se que em praticamente todos os pontos as esferas de vidro obtiveram uma maior dinâmica. Isso acontece porque o vidro apresenta uma escoabilidade maior que a da soja, visto que seu ângulo de repouso, estático e dinâmico, é inferior. Outro fator relevante é o maior valor do coeficiente de atrito de rolamento

da partícula de soja, o que resulta em um leito granular mais rígido, inibindo a movimentação das partículas.

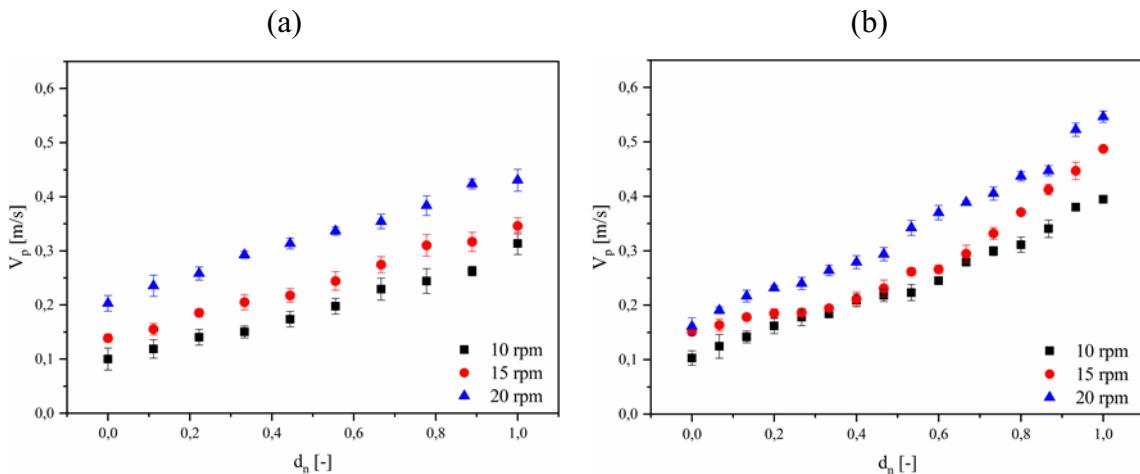


Figura 4.11: Velocidade das esferas de vidro para o ângulo de inclinação de 60° : a) grau de preenchimento 2% e b) grau de preenchimento 5%.

4.7. Simulações numéricas utilizando o Método dos Elementos Discretos (MED)

4.7.1. Análise de sensibilidade dos parâmetros numéricos MED

O MED é uma ferramenta muito aplicada no auxílio à compreensão dos escoamentos granulares. Porém, para implementação adequada, a sua modelagem depende de alguns parâmetros de entrada: coeficiente de restituição (e), coeficiente atrito estático (μ_s) e coeficiente de atrito de rolamento (μ_r), tanto nas interações partícula-partícula (pp), quanto nas interações partícula-parede (pw).

Para uma melhor compreensão desses parâmetros no disco rotatório, foi realizado uma análise de sensibilidade por meio de um Planejamento Composto Central (Tabela 3.2) e a resposta analisada foi o número de contatos entre as partícululas (Nc_{pp}).

Primeiramente, o PCC foi aplicado para três ângulos de inclinação diferentes (40° , 50° e 60°) e o grau de preenchimento foi fixado em 2%. Os resultados do planejamento são apresentados no Apêndice B.

As Equações 4.6 a 4.8 foram obtidas utilizando técnicas de regressão múltipla e são referentes aos ângulos de inclinação 40° , 50° e 60° , respectivamente.

$$Nc_{pp-40^\circ} = 1,17 - 0,05x_1 + 0,05x_1^2 + 0,05x_2^2 - 0,09x_3 - 0,36x_4 + 0,16x_4^2 + 0,06x_5^2 + 0,05x_6^2 \quad R^2 = 0,94 \quad (4.6)$$

$$Nc_{pp-50^\circ} = 1,18 - 0,05x_1 + 0,06x_1^2 + 0,06x_2^2 - 0,12x_3 + 0,06x_3^2 - 0,40x_4 + 0,17x_4^2 + 0,07x_5^2 + 0,06x_6^2 - 0,04x_1x_4 \quad R^2 = 0,95 \quad (4.7)$$

$$Nc_{pp-60^\circ} = 1,19 - 0,05x_1 + 0,06x_1^2 + 0,06x_2^2 - 0,13x_3 + 0,06x_3^2 - 0,41x_4 + 0,18x_4^2 + 0,07x_5^2 + 0,06x_6^2 - 0,03x_1x_4 \quad R^2 = 0,95 \quad (4.8)$$

Onde:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{e_{pp} - 0,50}{0,25} & x_2 &= \frac{e_{pw} - 0,50}{0,25} & x_3 &= \frac{\mu_{Spp} - 0,50}{0,25} \\ x_4 &= \frac{\mu_{Spw} - 0,50}{0,25} & x_5 &= \frac{\mu_{Rpp} - 0,050}{0,025} & x_6 &= \frac{\mu_{Rpw} - 0,050}{0,025} \end{aligned}$$

A partir da análise de regressão, observa-se que todos os parâmetros contribuíram de forma significativa no número de contato entre as partículas, para um nível de significância de 5%. O coeficiente de restituição partícula-parede e os coeficientes de atrito de rolamento apresentaram somente influência do termo quadrático.

Apesar de todos os parâmetros MED apresentarem significância, o coeficiente de atrito estático partícula-parede (μ_{Spw}) se sobressai em relação aos demais. Realizando uma análise em cima dos valores dos efeitos, observa-se que os valores encontrados para μ_{Spw} chegam a ser quase 4 vezes maior que o efeito do segundo parâmetro mais relevante (μ_{Spp}) e 8 vezes maior que o e_{pp} . Isso demonstra que, dentre os parâmetros analisados, o coeficiente de atrito estático partícula-parede é o que apresenta maior impacto sobre o número de contatos entre partículas no disco rotatório.

Um outro fator importante a ser analisado é que o μ_{Spw} possui um efeito negativo, prejudicando o contato entre as partículas. No que diz respeito à concepção de projetos e otimização de um disco rotatório, essa informação é crucial, pois a depender da interação entre material granular e a parede do equipamento, o processo de granulação pode não ocorrer de forma eficiente.

Comparando o efeito entre os mesmos parâmetros das Equações 4.6 a 4.8, observa-se que os valores são semelhantes, ou seja, aparentemente a mudança no ângulo de inclinação do disco rotatório não exerceu influência no número de contato entre as partículas.

O mesmo PCC foi aplicado, porém dessa vez fixou-se o ângulo de inclinação de 40° e variou-se o grau de preenchimento em 2, 5 e 8%. A tabela de resultados é apresentada no Apêndice B.

A técnica de regressão múltipla foi utilizada novamente e as Equações 4.9 a 4.11 obtidas são referentes aos graus de preenchimento 2, 5 e 8%, respectivamente.

$$Nc_{pp-2\%} = 1,17 - 0,05x_1 + 0,05x_1^2 + 0,05x_2^2 - 0,09x_3 - 0,36x_4 + 0,16x_4^2 + 0,06x_5^2 + 0,05x_6^2 \quad R^2 = 0,94 \quad (4.9)$$

$$Nc_{pp-5\%} = 1,40 - 0,05x_1 + 0,03x_1^2 - 0,08x_3 + 0,04x_3^2 - 0,24x_4 + 0,17x_4^2 + 0,04x_5 - 0,03x_3x_4 - 0,05x_4x_5 \quad R^2 = 0,95 \quad (4.10)$$

$$Nc_{pp-8\%} = 1,57 - 0,05x_1 - 0,10x_3 - 0,14x_4 + 0,13x_4^2 + 0,04x_5 - 0,05x_4x_5 \quad R^2 = 0,89 \quad (4.11)$$

Onde:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{e_{pp} - 0,50}{0,25} & x_2 &= \frac{e_{pw} - 0,50}{0,25} & x_3 &= \frac{\mu_{Spp} - 0,50}{0,25} \\ x_4 &= \frac{\mu_{Spw} - 0,50}{0,25} & x_5 &= \frac{\mu_{Rpp} - 0,050}{0,025} & x_6 &= \frac{\mu_{Rpw} - 0,050}{0,025} \end{aligned}$$

Nota-se que, para os graus de preenchimento de 5 e 8%, os parâmetros e_{pw} e o μ_{Rpw} não foram significativos na resposta analisada, para um nível de significância de 5%.

Analizando as Equações 4.9 a 4.11, destaca-se novamente que o coeficiente de atrito estático partícula-parede (μ_{Spw}) apresentou efeito superior que os demais parâmetros. Entretanto, conforme aumentou-se o grau de preenchimento, a intensidade do efeito deste coeficiente diminuiu. Isso acontece porque, para 2% de preenchimento, a proporção de partículas em contato com a parede do equipamento é maior que em 8%. Para comprovar essa afirmação, analisou-se para os dois graus de preenchimento o número de contato partícula-parede (Nc_{pw}) da simulação do ponto central (nº 45 do PCC – ver APÊNDICE B). Para

possibilitar a comparação entre os dois resultados, o número de contatos partícula-parede foi dividido pela quantidade total de partículas presente no sistema.

Para o grau de preenchimento de 2 e 8%, a simulação no ponto central apresentou um Nc_{pw} por partícula de 0,32 e 0,18, respectivamente. Desse modo, 4 partículas no grau de preenchimento de 2% correspondem, em média, 1 contato com a parede, enquanto para 8% são necessários, em média, 6 partículas. Corroborando com a afirmação dita anteriormente, em que a diminuição do grau de preenchimento aumenta a proporção de partículas em contato com a parede do equipamento e, consequentemente, sofre uma maior influência do μ_{Spw} .

Para se obter uma melhor análise do comportamento do ângulo de inclinação e do grau de preenchimento no número de contato partícula-partícula, foi elaborado um outro Planejamento Composto Central, onde investigou-se a influência das condições operacionais nos resultados do número de contato partícula-partícula (Nc_{pp}).

4.7.2. Análise da influência das condições operacionais do disco rotatório no número de contato partícula-partícula

Foi desenvolvido outro PCC com intuito de analisar a influência do grau de preenchimento (GP), do ângulo de inclinação (AI) e da velocidade de rotação (VR) no número de contato entre as partículas. Novamente, destaca-se que, para permitir a comparação, os resultados foram divididos pelo número total de partículas presentes no sistema.

Com base no resultado do Planejamento Composto Central (Apêndice C), foi obtido a Equação 4.12.

$$Nc_{pp} = 1,27 + 0,19x_1 - 0,09x_1^2 + \\ + 0,03x_2 - 0,23x_3 + 0,06x_3^2 \quad R^2 = 0,97 \quad (4.12)$$

Onde:

$$x_1 = \frac{GP - 5}{3} \quad x_2 = \frac{AI - 50}{10} \quad x_3 = \frac{VR - 20}{10}$$

sendo: GP está em %, AI em °, e VR em rpm

A Equação 4.12 apresenta aspectos muito importantes para a eficiência do processo de granulação em um disco rotatório. Primeiramente, nota-se que todas as condições operacionais analisadas apresentaram influência significativa sobre a resposta, quando avaliado em um nível

de significância de 5%. Observa-se ainda que não houve ação combinada (interação) entre as condições operacionais analisadas, isso significa que, cada variável apresenta uma influência de forma direta no número de contato entre as partículas.

Percebe-se que o ângulo de inclinação (AI), apesar de ser significativo, apresenta um efeito bem inferior ao do grau de preenchimento e da velocidade de rotação. A alteração da inclinação do disco rotatório não apresenta muita influência no contato entre as partículas. Este resultado confirma a análise realizada na Seção 4.7.1, onde notou-se que, mesmo alterando a inclinação do equipamento, os efeitos dos parâmetros MED praticamente se mantiveram constantes.

O grau de preenchimento teve um efeito positivo, ou seja, quanto maior o número de partículas presente no sistema mais eficiente é o contato entre elas. Já para a velocidade de rotação, observa-se que ela apresenta um efeito negativo, prejudicando o Nc_{pp} . Normalmente, no processo de granulação, a velocidade de rotação é aumentada para se obter um maior tempo de residência do material e assim, controlar a taxa de crescimento do aglomerado. De acordo com Pietsch (1991), deve-se ter um controle fino da velocidade de rotação, para que o disco rotatório esteja sempre operando em regime de rolamento. Um aumento excessivo na velocidade pode ocasionar a transição para o regime catarateamento, o que, segundo o autor, deve ser evitado. Capes (1980) destaca que é necessário ter muito cuidado ao se trabalhar com elevadas velocidades de rotação e graus de preenchimento, pois pode resultar em um crescimento descontrolado do aglomerado, prejudicando sua qualidade final.

É claro que, na granulação, outros fatores podem influenciar no processo e outras respostas devem ser analisadas. Entretanto, a Equação 4.12 apresenta um direcionamento muito importante na compreensão do processo de granulação, auxiliando nas questões de operação, projeto e otimização de um disco rotatório.

4.7.3. Simulação dos regimes de escoamento

O Método dos Elementos Discretos também foi utilizado para se analisar o comportamento dos regimes de escoamento. A princípio, com intuito de preservar o significado físico, os valores dos parâmetros MED utilizados na modelagem, foram obtidos experimentalmente e são apresentados na Tabela 4.8. Como não foi possível obter, para soja,

valores do coeficiente de atrito de rolamento partícula-partícula (μ_{Rpp}), manteve-se o valor de 0,010 que corresponde ao valor da configuração padrão do *software*.

Tabela 4.8: Valores experimentais dos parâmetros MED implementados na modelagem.

	e_{pp}	e_{pw}	μ_{Spp}	μ_{Spw}	μ_{Rpp}	μ_{Rpw}
Vidro	0,900	0,690	0,620	0,330	0,014	0,013
Soja	0,670	0,480	0,570	0,380	0,010	0,026

Para verificar a efetividade dos valores dos parâmetros MED, presentes na Tabela 4.8, os resultados das simulações numéricas foram comparados com os resultados encontrados experimentalmente. Realizou-se duas análises, uma qualitativa confrontando as imagens dos regimes de escoamento e outra quantitativa, por meio do ângulo de partida.

Esfera de vidro

Detalhando primeiramente os resultados encontrados para as esferas de vidro, observou-se que os valores dos parâmetros MED obtidos experimentalmente, ao serem implementados no modelo, não foram adequados para as condições operacionais analisadas. Ao relacionar as imagens numéricas, dos regimes de escoamento, com as imagens experimentais, notou-se que elas não eram representativas. As imagens se divergiam principalmente para o regime de centrifugação, onde em alguns casos a centrifugação ocorria ou não, em velocidades de rotação inferiores. Assim, como os valores experimentais dos parâmetros MED não foram satisfatórios, houve-se a necessidade de se aplicar um processo de calibração. Esse processo consiste em alterar os valores dos parâmetros, até alcançar uma combinação de valores em que a resposta numérica coincide com a experimental. Entretanto, levando em consideração o custo computacional e a análise de sensibilidade realizada na Seção 4.7.1, optou-se em manter os valores experimentais dos demais parâmetros e alterar somente o coeficiente de atrito estático partícula-parede (μ_{Spw}), visto que este coeficiente foi o que apresentou o maior efeito. A calibração seguiu a sequência do fluxograma apresentado na Figura 4.12.

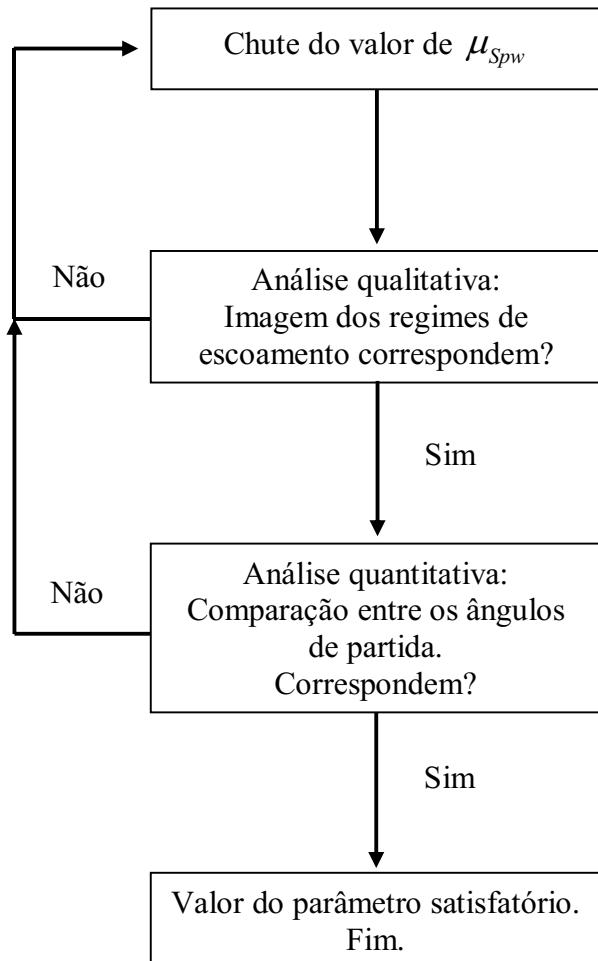


Figura 4.12: Fluxograma utilizado no processo de calibração.

Primeiramente foi atribuído um determinado valor para o μ_{Spw} . Logo após o término da simulação, uma análise qualitativa foi realizada, onde as imagens numéricas dos regimes de escoamento foram comparadas com as experimentais. Se as imagens não fossem correspondentes, aplicava-se outro valor para μ_{Spw} , se sim, seguia-se para a análise quantitativa. Nessa análise, os valores numéricos do ângulo de partida foram medidos e comparados com os valores experimentais. Se houvesse uma discrepância muito grande entre as medidas, outro valor de μ_{Spw} era utilizado, reiniciando o processo de calibração. Se os ângulos de partida fossem próximos, então o valor do parâmetro era adequado e o processo de calibração era encerrado.

O fluxograma utilizado no processo de calibração foi aplicado para todas as condições operacionais analisadas. Os valores encontrados para μ_{Spw} que melhor representaram o comportamento experimental são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Valores de μ_{Spw} para esferas de vidro encontrados na calibração.

Ângulo de Inc.	Grau de P.	2%	5%	8%
	40°	0,305	0,300	0,280
	50°	0,360	0,350	0,320
	60°	0,365	0,360	0,360

Nota-se que os valores obtidos pelo processo de calibração, para as esferas de vidro, mantiveram-se em torno do valor experimental (0,33). Considerando que a medida experimental do μ_{Spw} apresentou um desvio de $\pm 0,03$, destaca-se que 7 dos 9 valores apresentados da Tabela 4.9 estiveram dentro do intervalo de 0,30-0,36, ou seja, um valor considerando o significado físico do parâmetro foi conservado em quase todas as situações.

Devido à dificuldade das medições experimentais e a falta de padronização de metodologias, o processo de calibração é comumente utilizado pela literatura para se determinar os parâmetros MED, não havendo uma preocupação, por parte dos autores, em manter os seus significados físicos. Porém, ressalta-se que, além de ser possível obter resultados numéricos satisfatórios, os valores experimentais dos parâmetros MED também demonstraram ser uma excelente estimativa inicial para o processo de calibração, reduzindo o esforço computacional.

As Figura 4.13 a 4.15 apresentam o comparativo das imagens, a partir de resultados experimentais e simulação numérica, observando os regimes de escoamento para os ângulos de inclinação de 40, 50 e 60°, respectivamente.

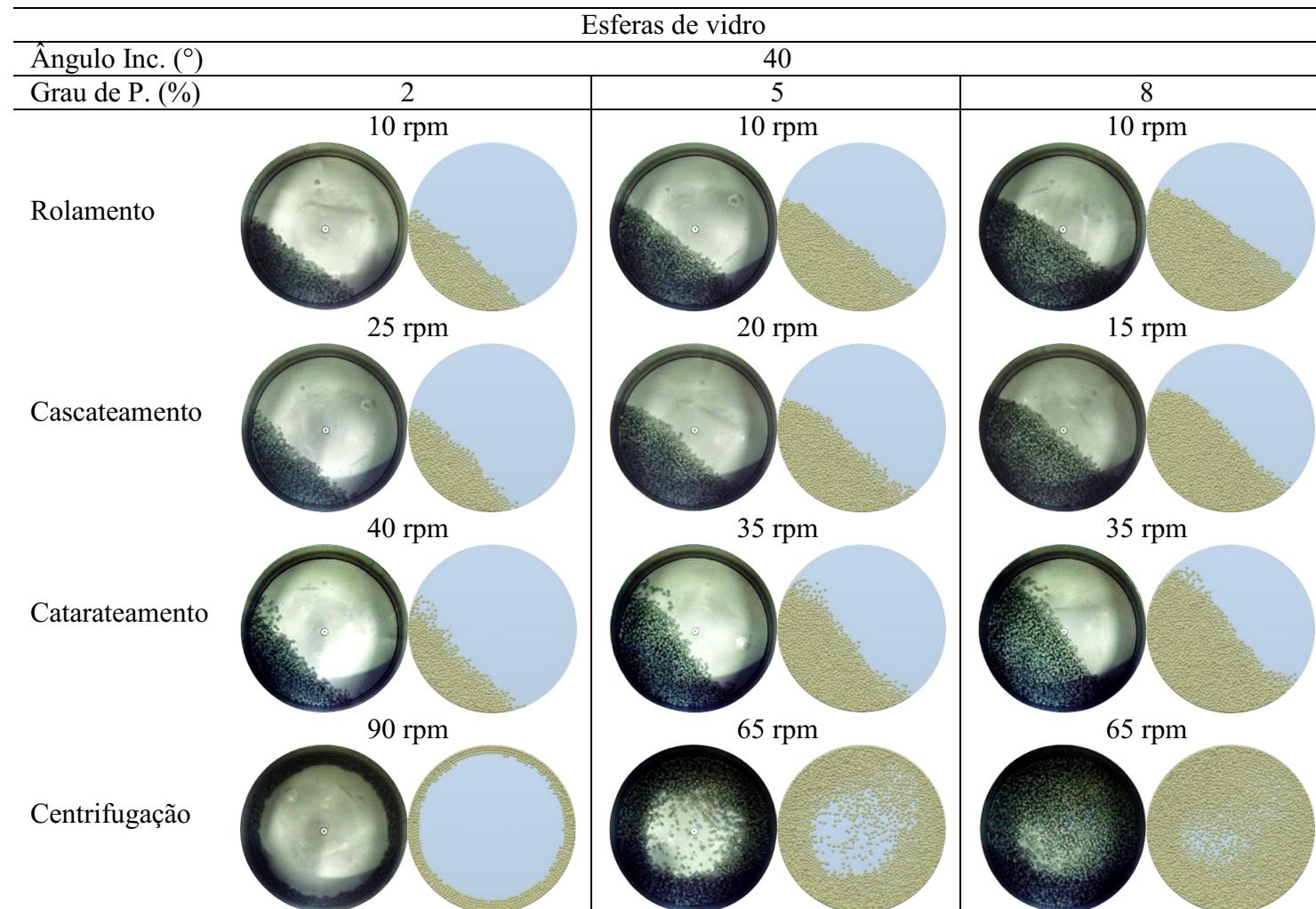


Figura 4.13: Análise qualitativa dos regimes de escoamento das esferas de vidro, numérico e experimental, para o ângulo de inclinação de 40° .

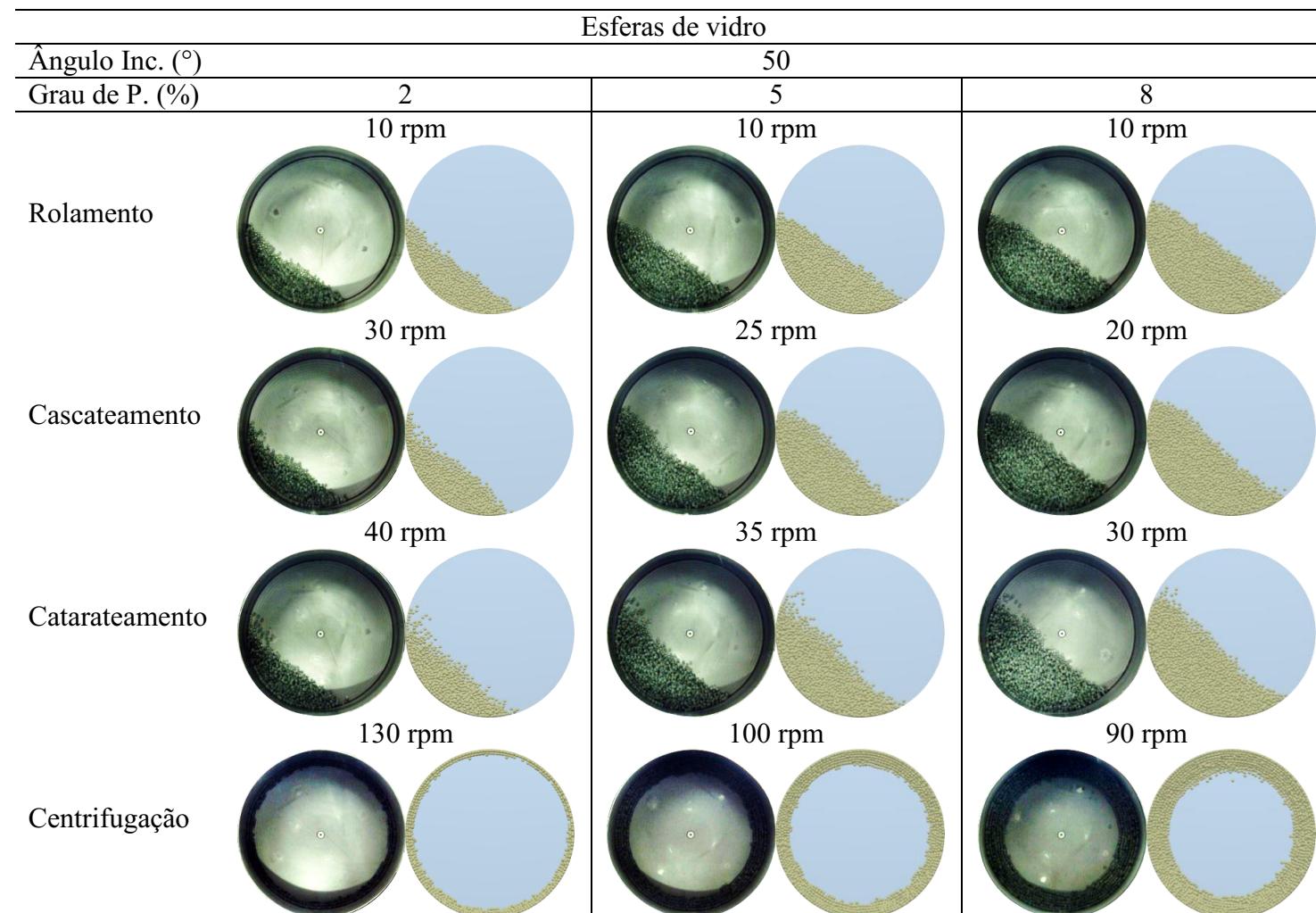


Figura 4.14: Análise qualitativa dos regimes de escoamento das esferas de vidro, numérico e experimental, para o ângulo de inclinação de 50° .

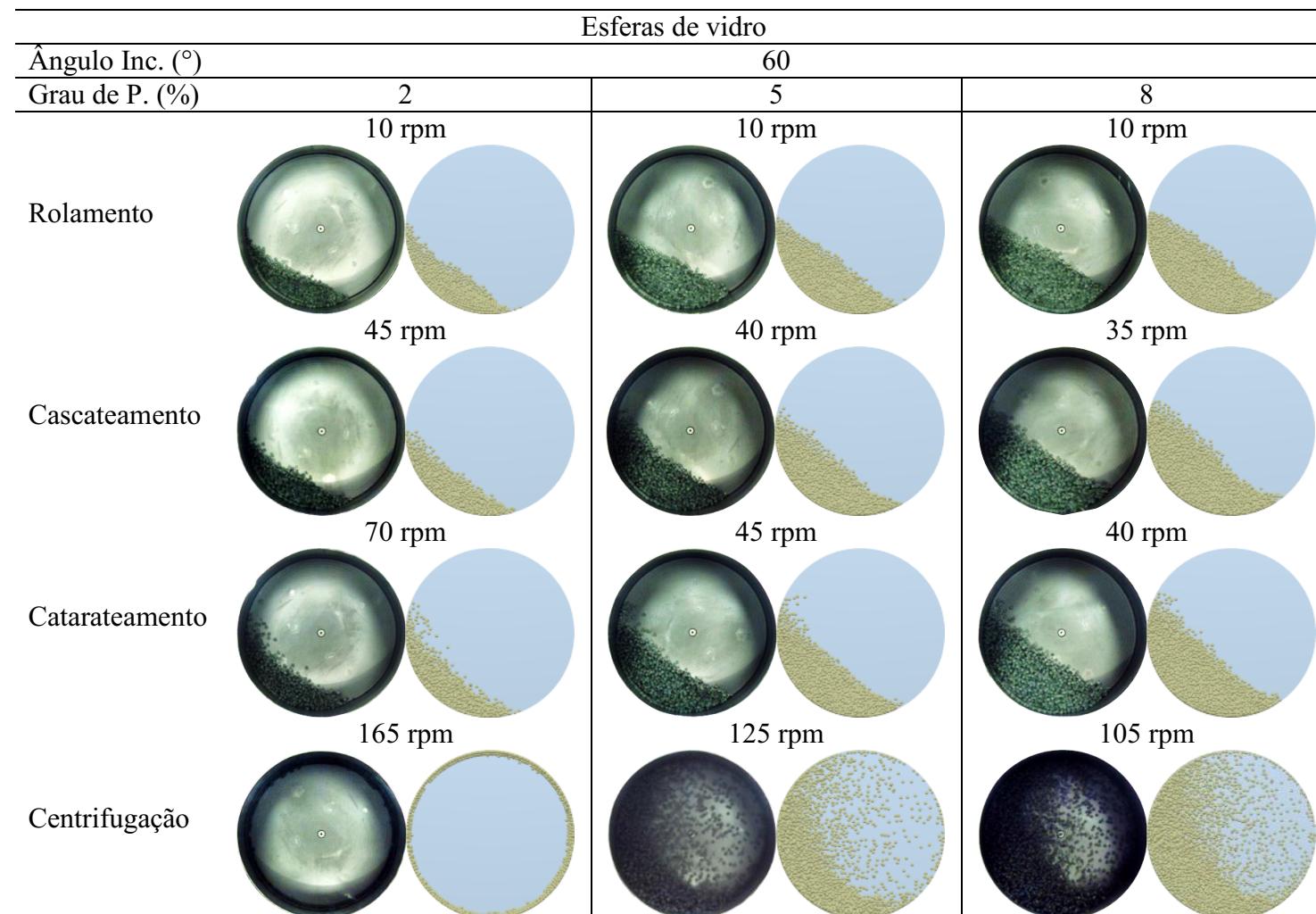


Figura 4.15: Análise qualitativa dos regimes de escoamento das esferas de vidro, numérico e experimental, para o ângulo de inclinação de 60° .

Analizando as Figuras 4.13 a 4.15, nota-se que o MED conseguiu representar de forma adequada os regimes de escoamento observados na análise experimental. Destaca-se que as simulações numéricas conseguiram caracterizar os dois critérios de centrifugação, quando somente uma camada de partículas aderem a parede do disco rotatório e quando ocorre a centrifugação total das partículas.

A Figura 4.16 apresenta o comparativo do ângulo de partida numérico e experimental (análise quantitativa), para os ângulos de inclinação de 40, 50 e 60°.

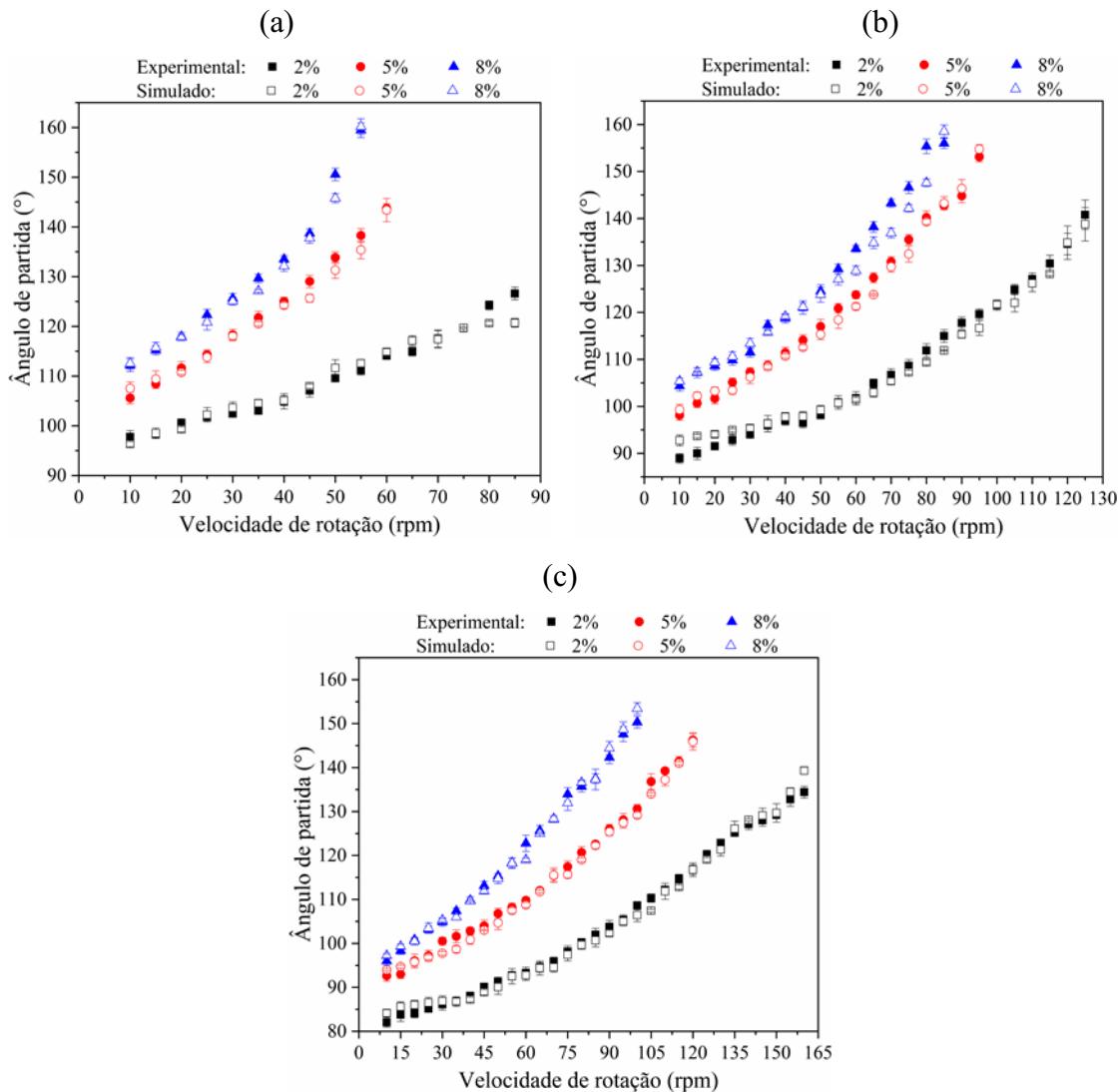


Figura 4.16: Comparativo do ângulo de partida, experimental e numérico, das esferas de vidro para os ângulos de inclinação: a) 40°, b) 50° e c) 60°.

Visualmente, observa-se uma proximidade dos ângulos de partida, experimental e numérico. Para se ter uma análise mais minuciosa dos resultados, calculou-se a média dos

desvios de cada condição. Os valores são apresentados da Tabela 4.10, onde a média dos desvios encontrados estão abaixo de 2%, confirmando a semelhança entre os resultados.

Tabela 4.10: Média dos desvios dos ângulos de partida, experimental e numéricos, para as esferas de vidro.

Grau de P. ↓	2%	5%	8%
Ângulo de Inc. →			
40°	1,27%	1,16%	0,98%
50°	1,63%	1,31%	1,77%
60°	0,99%	1,12%	0,81%

Após as análises qualitativa e quantitativa das esferas de vidro, comprovou-se que os parâmetros MED, utilizados na modelagem, são adequados e conseguiram reproduzir os escoamentos granulares estudados.

Com a garantia e a segurança da representatividade dos parâmetros MED, foi investigado a influência de diferentes condições operacionais na força máxima de colisão ($F_{C,\max}$). A $F_{C,\max}$ foi analisada com base em um planejamento 3^k , para os ângulos de inclinação (AI) de 40, 50 e 60°, nos graus de preenchimento (GP) de 2, 5 e 8% e para as velocidades de rotação (VR) de 10, 30 e 50 rpm.

Por meio dos resultados do planejamento, apresentados no Apêndice D, foi possível obter a Equação 4.13.

$$F_{C,\max} = 1,61 + 0,10x_1 - 0,10x_2^2 + 0,33x_3 - \\ - 0,12x_1x_2 - 0,19x_2x_3 + 0,09x_2x_3^2 - 0,10x_2^2x_3 \quad R^2 = 0,82 \quad (4.13)$$

Onde:

$$x_1 = \frac{GP - 5}{3} \quad x_2 = \frac{AI - 50}{10} \quad x_3 = \frac{VR - 30}{20}$$

sendo: GP está em %, AI em °, e VR em rpm.

Observa-se que todas condições operacionais analisadas influenciaram na $F_{C,\max}$, para um nível de significância de 5%. O aumento do grau de preenchimento e da velocidade de rotação intensificaram a força de colisão, enquanto o ângulo de inclinação teve um efeito oposto.

O ângulo de inclinação apesar de não ter uma influência linear na força de colisão, apresentou uma ação combinada com as demais variáveis. Isso demonstra que, para se evitar trabalhar com forças de colisões muito elevadas, deve-se realizar uma análise conjunta de todas as condições operacionais.

Na Seção 4.5, quando se analisou o ângulo de partida, destacou-se o cuidado de se trabalhar com alturas do leito granular muito elevadas, pois a depender da intensidade, as colisões das partículas poderiam acarretar na degradação do aglomerado formado. O resultado do planejamento 3^k confirma essa afirmação. Uma vez que, as condições operacionais que intensificaram a força de colisão das partículas, foram as mesmas que também aumentaram o ângulo de partida.

Partícula de soja

Assim como observado para as esferas de vidro, os valores experimentais dos parâmetros numéricos MED, quando implementados no modelo, não conseguiram representar de forma adequada as observações experimentais. Portanto, novamente foi necessário realizar o processo de calibração, seguindo o fluxograma apresentado na Figura 4.12.

A calibração foi aplicada para todas as condições operacionais analisadas e os valores encontrados para μ_{Spw} que melhor representaram o comportamento experimental são apresentados na Tabela 4.11. Nota-se que, diferentemente das esferas de vidro, os valores do coeficiente de atrito estático partícula-parede, obtidos pela calibração, não estiveram próximo do valor encontrado experimentalmente. Desse modo, para as partículas de soja, não foi possível manter o significado físico deste parâmetro.

Tabela 4.11: Valores de μ_{Spw} para partículas de soja encontrados na calibração.

Grau de P.		2%	5%	8%
Ângulo de Inc.				
40°		0,95	0,95	0,90
50°		0,71	1,00	1,00
60°		0,45	0,45	0,50

As Figura 4.17 a 4.19 apresentam o comparativo das imagens, numérica e experimental, dos regimes de escoamento das partículas de soja.

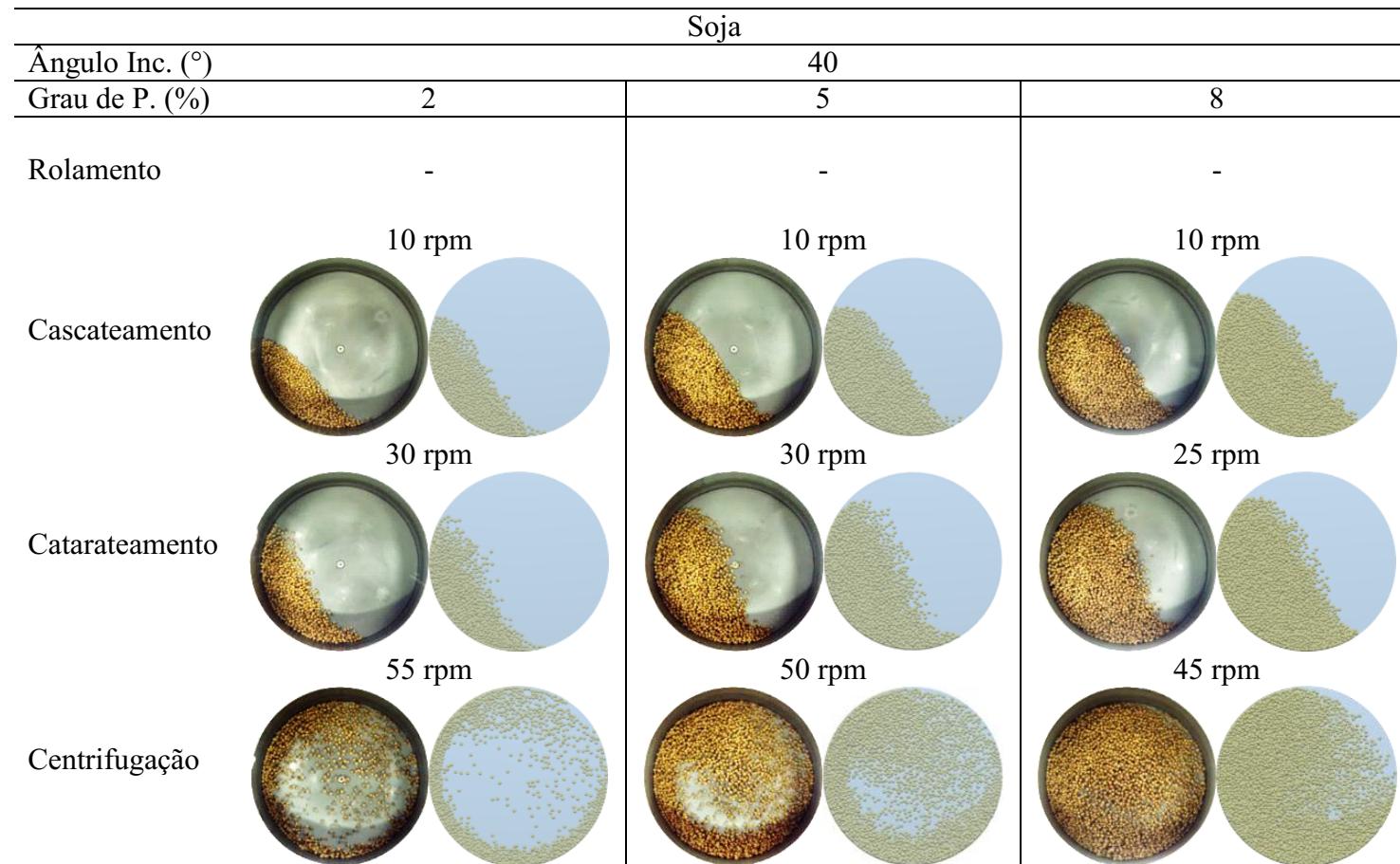


Figura 4.17: Análise qualitativa dos regimes de escoamento das partículas de soja, numérico e experimental, para o ângulo de inclinação de 40° .

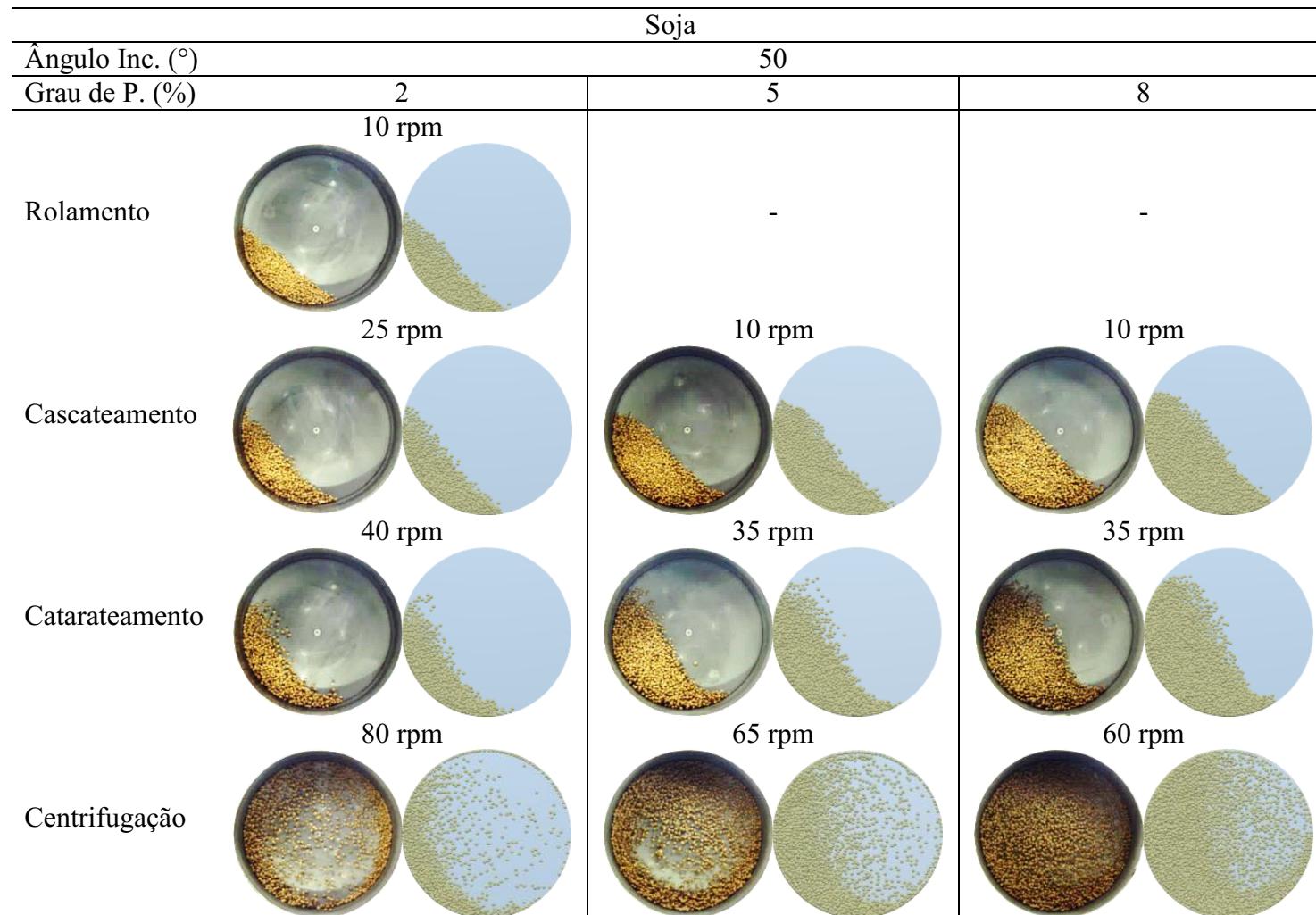


Figura 4.18 Análise qualitativa dos regimes de escoamento das partículas de soja, numérico e experimental, para o ângulo de inclinação de 50° .

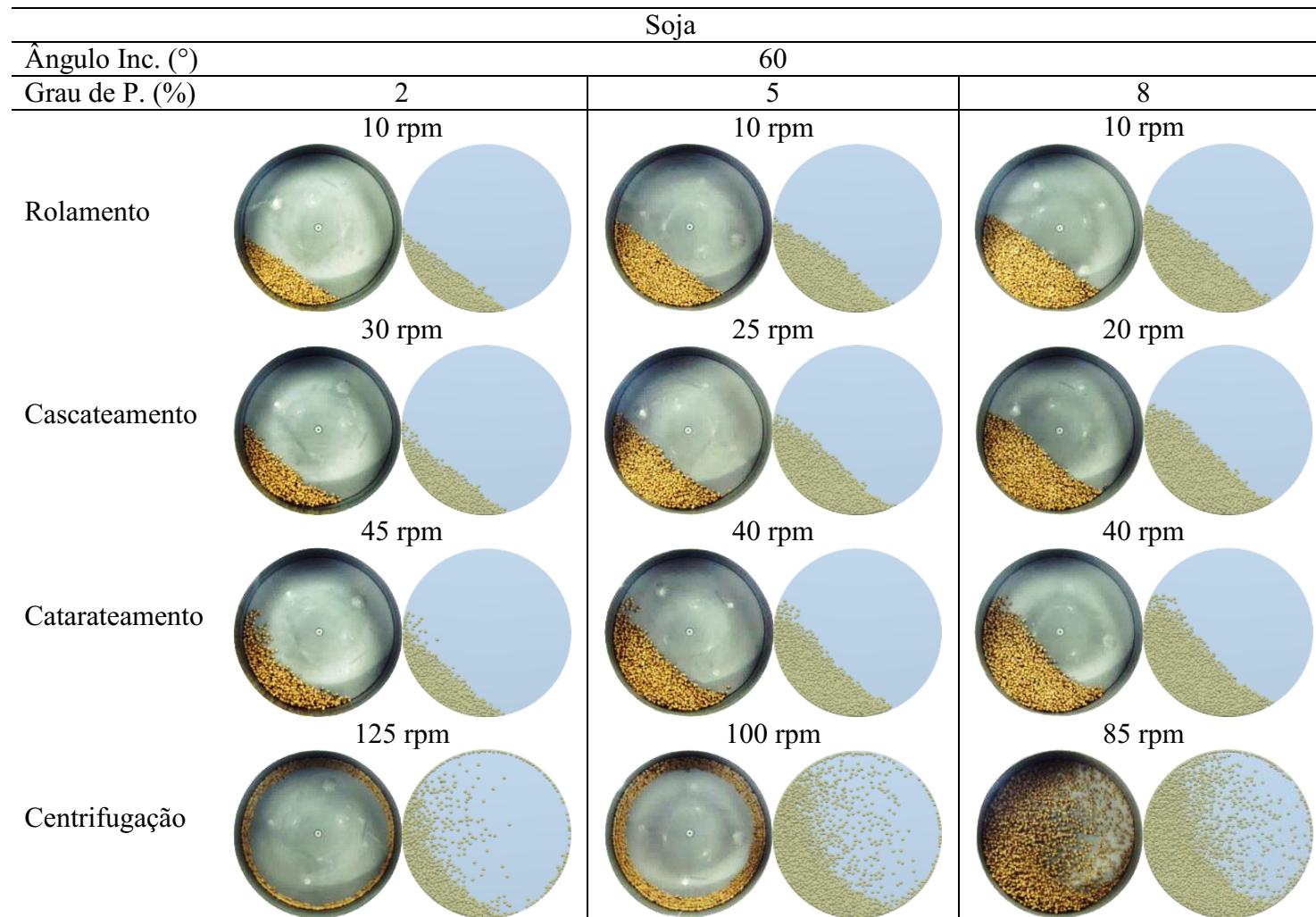


Figura 4.19: Análise qualitativa dos regimes de escoamento das partículas de soja, numérico e experimental, para o ângulo de inclinação de 60°.

Analizando as Figura 4.17 a 4.19 em algumas condições, as imagens não foram representativas. Na Figura 4.17 observa-se que, no grau de preenchimento de 8%, o regime de escoamento numérico, apesar de próximo, não chegou a condição de centrifugação. Tentou-se aumentar o coeficiente de atrito estático partícula-parede (μ_{Spw}), porém, houve muita influência no comportamento do leito granular. A Figura 4.20 apresenta um comparativo entre os dois valores de μ_{Spw} (0,9 e 1,8).



Figura 4.20: Comparação de valores μ_{Spw} para partículas de soja com o disco rotatório operando a uma velocidade de rotação de 45 rpm, ângulo de inclinação de 40° e 8% de grau de preenchimento.

A Figura 4.20 demonstra que para $\mu_{Spw} = 0,9$ o leito granular não atingiu o regime de centrifugação e, mesmo dobrando o valor do coeficiente (1,8), o regime também não foi alcançado.

As outras imagens numéricas que destoaram das imagens experimentais, foram no regime de centrifugação para os graus de preenchimento de 2 e 5%, conforme pode ser observado na Figura 4.19 (ângulo de inclinação de 60°). Percebe-se que a centrifugação ocorreu, porém, as partículas não aderiram completamente a parede do disco rotatório, como observa-se no resultado experimental. Nas duas condições, ao se aumentar o valor do μ_{Spw} , a centrifugação era antecipada, ocorrendo em velocidades inferiores a experimental.

Pelas análises, fica evidente que para as partículas de soja, em algumas condições operacionais, apenas a alteração do μ_{Spw} não foi suficiente para que a resposta numérica se assemelhasse com a experimental, necessitando da calibração de outros parâmetros numéricos.

Um possível motivo para a não correspondência dos resultados, pode ser o coeficiente de atrito de rolamento partícula-partícula (μ_{Rpw}). Analisando os valores experimentais dos parâmetros MED, para a partícula soja, apresentados na Tabela 4.8, observa que este coeficiente foi o único em que se manteve o valor padrão (0,01). Este valor é inferior ao coeficiente de atrito de rolamento partícula-parede ($\mu_{Rpw} = 0,026$), além de ser próximo do valor encontrado para as esferas de vidro (0,014). Considerando que o leito granular das partículas de soja se

caracteriza por ser mais compactado e rígido, o valor de 0,01 pode não ser representativo. Outro fator que pode estar influenciando no escoamento é o formato da partícula. Por mais que tenha se utilizado duas esferas para tentar representar o formato da partícula de soja, talvez um maior refinamento fosse necessário. Entretanto, quanto maior o número de esferas utilizado, maior será o custo computacional.

Acredita-se, em um primeiro momento, que os dois motivos apresentados estejam interferindo nos resultados. Porém, por ser tratar de um escoamento envolvendo uma partícula de formato irregular, a análise se torna mais complexa e a calibração de outros parâmetros não deve ser descartada.

Como a calibração conseguiu apresentar resultados numéricos semelhantes com os resultados experimentais para a maioria das condições operacionais analisadas. Optou-se em dar continuidade ao processo de calibração e comparou-se os valores de ângulo de partida. A Figura 4.21 apresenta o comparativo do ângulo de partida das partículas de soja, numérico e experimental, nos ângulos de inclinação de 40, 50 e 60°.

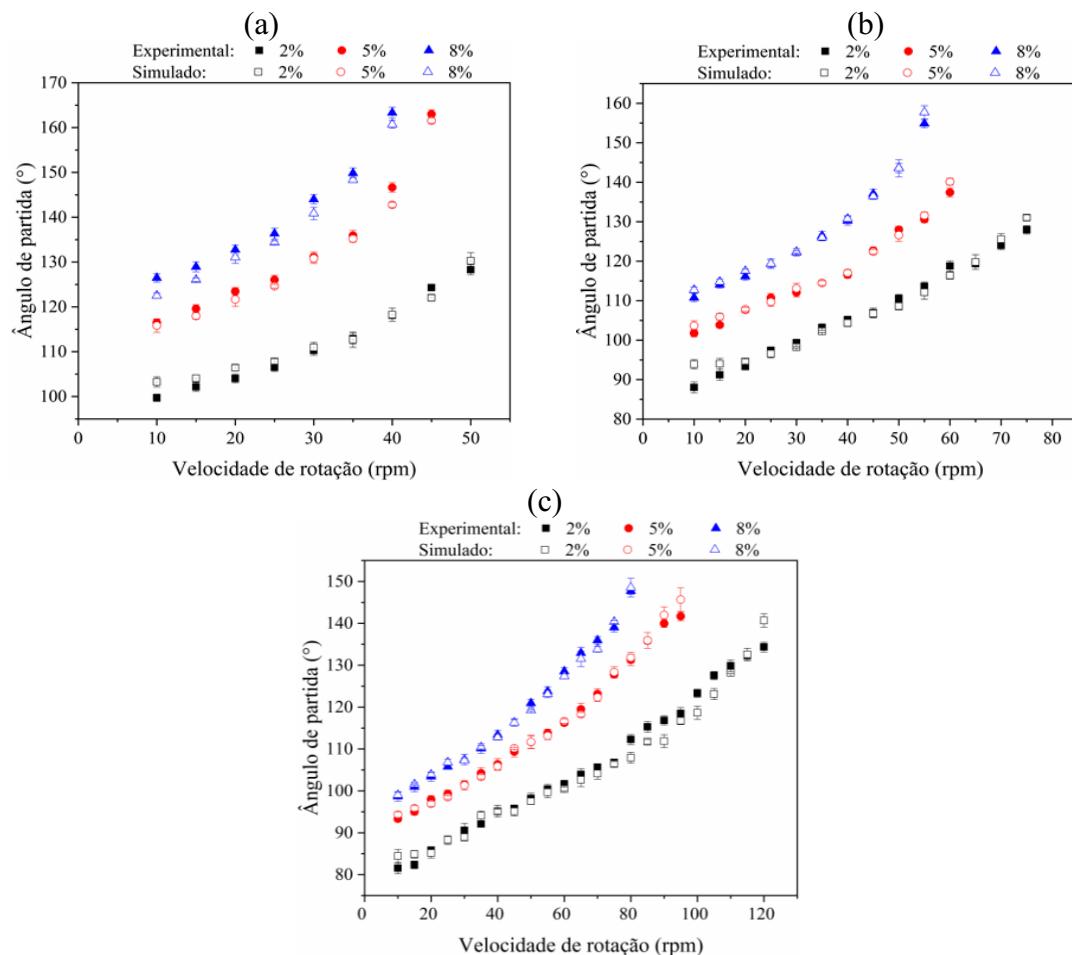


Figura 4.21: Comparativo do ângulo de partida, experimental e numérico, das partículas de soja para os ângulos de inclinação: a) 40°, b) 50° e c) 60°.

Observa-se similaridade entre os ângulos de partida, experimental e numérico, inclusive para as condições que falharam na análise qualitativa. A Tabela 4.12 apresenta a média dos desvios de cada condição.

Tabela 4.12: Média dos desvios dos ângulos de partida, experimental e numéricos, para as partículas de soja.

Ângulo de Inc.	Grau de P.	2%	5%	8%
	40°	1,47%	1,10%	1,84%
	50°	1,70%	0,94%	0,67%
	60°	1,91%	0,85%	0,52%

A média dos desvios encontrados estão abaixo de 2%, o que confirma a semelhança dos resultados. Os resultados da Tabela 4.12 demonstram a importância de se ter realizado duas etapas na calibração (qualitativa e quantitativa). Se a análise dependesse somente da resposta quantitativa, os valores dos parâmetros MED, encontrados na calibração, teriam sido representativos. Porém, verificou-se que, alguns valores não conseguiram representar de forma adequada o regime de centrifugação.

Levando em consideração todas as análises realizadas, a opção de se calibrar somente o coeficiente de atrito estático partícula-parede foi adequada. Pois, foi possível preservar o significado físico da maioria dos parâmetros numéricos, diminuindo o esforço computacional e obtendo respostas satisfatórias em praticamente todas as condições estudadas.

Alguns autores destacam que os valores dos parâmetros MED, quando utilizados em um processo, podem não ser representativos em outro processo, necessitando de uma nova calibração (COETZEE, 2016; JUST *et al.*, 2013; MARIGO e STITT, 2015). Entretanto, observou-se que, o simples fato de se alterar o grau de preenchimento e/ou o ângulo de inclinação do disco rotatório, foi necessário atribuir novos valores ao μ_{spw} , o que torna a análise dos parâmetros mais complexa.

O Método dos Elementos Discretos (MED), conseguiu reproduzir todos os regimes de escoamento analisados, demonstrando ser uma excelente ferramenta para a compreensão do comportamento granular. Porém, fica claro, o quanto trabalhoso e desgastante pode ser a determinação correta dos seus parâmetros de entrada.

4.7.4. Análise das camadas ativas e passivas no regime de rolamento

Com a determinação dos parâmetros MED, há uma maior confiança na representatividade dos resultados numéricos, em relação as observações experimentais. Os valores obtidos no processo de calibração, das esferas de vidro, foram utilizados para a análise numérica das camadas ativas e passivas do regime de rolamento. Devido à inclinação do disco rotatório, essas camadas acabam ficando escondidas na parte interna do leito granular, só sendo possível determiná-las numericamente.

As velocidades das partículas foram calculadas para as esferas de vidro, com o disco rotatório operando em regime de rolamento, no ângulo de inclinação de 50 e 60°, para os graus de preenchimento de 2 e 5% e para as velocidades de rotação de 10, 15 e 20 rpm. Os resultados encontrados para cada condição operacional são apresentados nas Figuras 4.22 e 4.23.

É possível observar a presença de dois comportamentos. O primeiro, iniciando em r próximo de 0, a velocidade de sólidos decresceu à medida que r aumentou, até alcançar um valor praticamente nulo na interface. Esse comportamento é característico da camada passiva, em que as partículas se movimentam em uma menor velocidade, como um corpo sólido e no sentido da rotação do equipamento. Logo após a interface, inicia-se a camada ativa, onde as velocidades das esferas de vidro aumentam ao longo da posição. Nessa região as partículas possuem uma maior dinâmica e se movimentam na direção oposta a camada passiva.

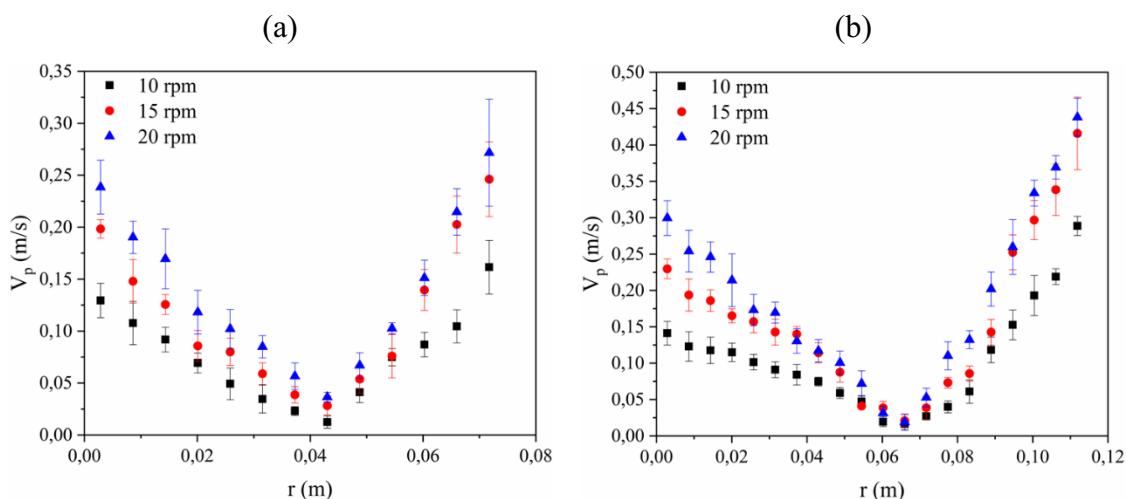


Figura 4.22: Perfis de velocidade das partículas de vidro para o ângulo de inclinação de 50°:
a) 2% e b) 5%.

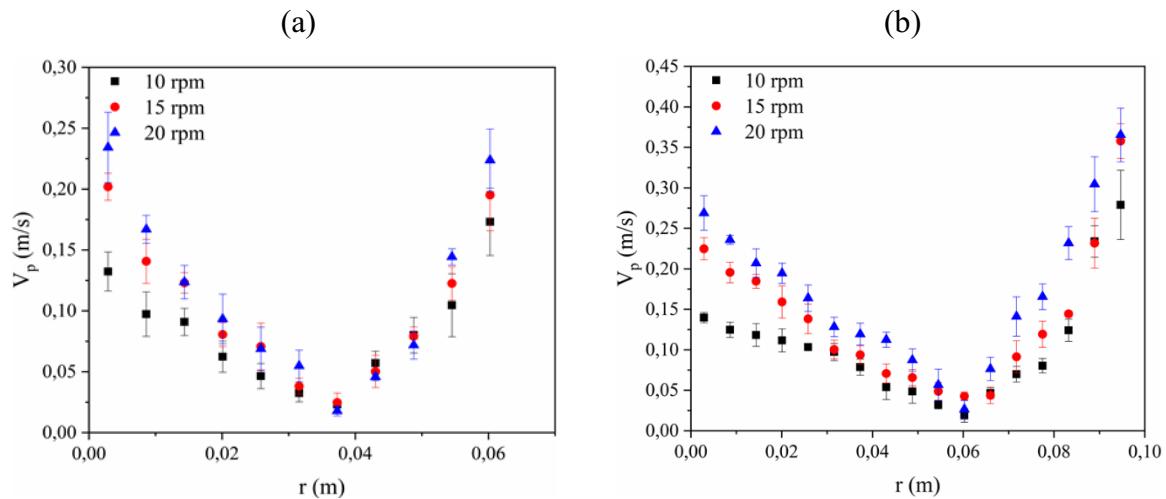


Figura 4.23: Perfis de velocidade das partículas de vidro para o ângulo de inclinação de 60°:
 a) 2% e b) 5%.

Nota-se que, para o mesmo ângulo de inclinação, quando se manteve o grau de preenchimento constante e aumentou-se a velocidade de rotação do disco, ocorreu um aumento na magnitude da velocidade das esferas de vidro, em ambas as camadas. Observa-se também que mantendo-se a velocidade de rotação constante e aumentando-se o grau de preenchimento, percebe-se um aumento da velocidade das partículas, tanto na camada ativa quanto na camada passiva.

Analizando a influência do ângulo de inclinação, quando se alterou a inclinação de 60° para 50° ocorreu um aumento na velocidade das partículas somente na camada ativa. Isso acontece porque, quando se diminui o ângulo de inclinação, o leito granular adquiriu um maior ângulo de partida, fazendo as partículas alcançarem uma maior altura de queda e, consequentemente, aumentando a sua dinâmica.

Como pode ser visto nas Figuras 4.22 e 4.23, quando se alterou o grau de preenchimento e o ângulo de inclinação, ocorreu uma mudança na posição da interface das camadas passiva-ativa. As espessuras de cada camada refletem diretamente nas taxas de transferência de massa e energia. No processo de granulação, as partículas de menor diâmetro tendem a se acumular ao fundo do disco rotatório (camada passiva). Assim, a análise da interface pode apresentar um indicativo da distribuição de partículas presentes em cada uma das camadas.

Como não houve interferência da velocidade de rotação, a velocidade de 10 rpm será utilizada para melhor exemplificar a influência das demais condições operacionais (grau de preenchimento e ângulo de inclinação) na posição da interface, conforme apresentado nas Figuras 4.24 e 4.25.

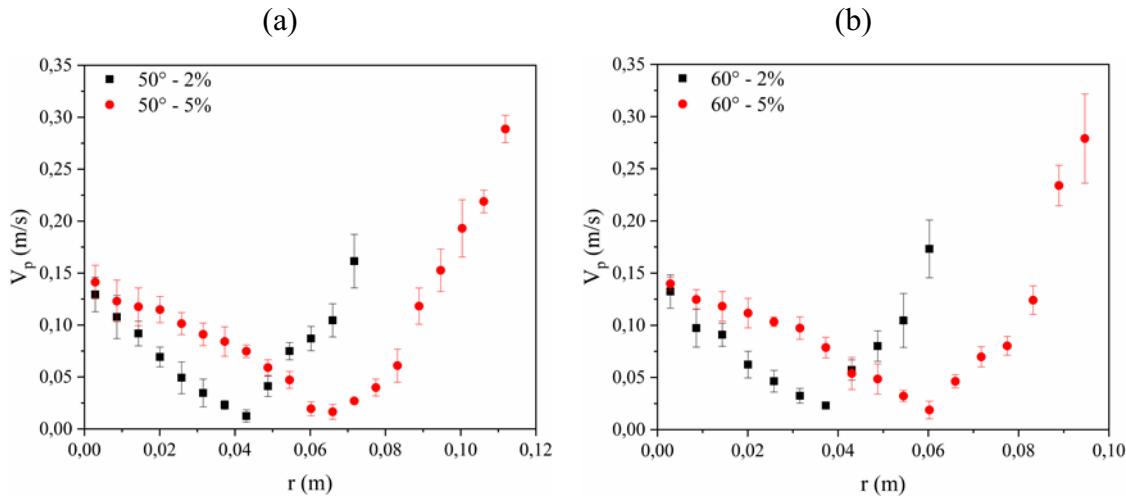


Figura 4.24: Comparação dos perfis de velocidade da esfera de vidro variando o grau de preenchimento de 2% para 5% nos ângulos de inclinação a) 50° e b) 60° .

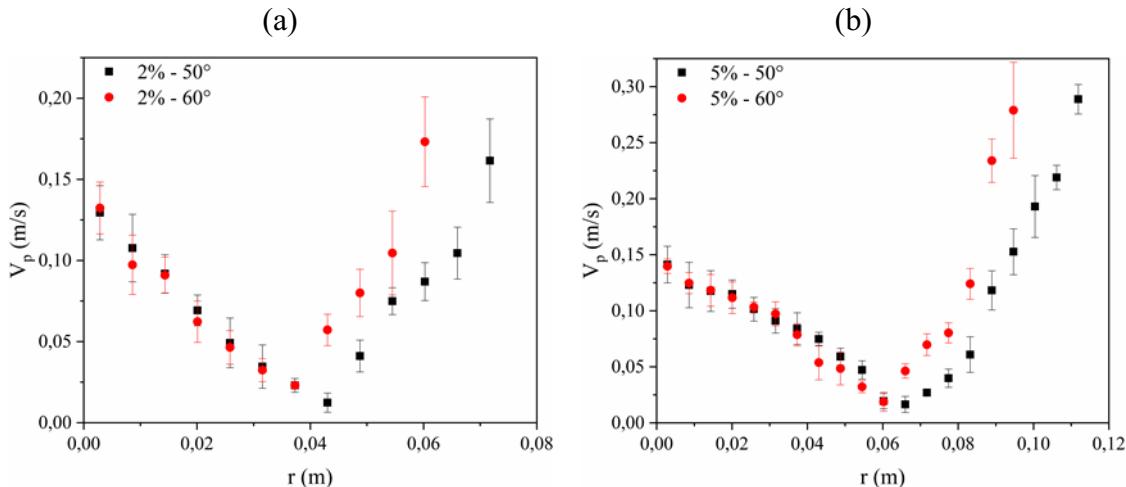


Figura 4.25: Comparação dos perfis de velocidade da esfera de vidro variando o ângulo de inclinação de 50° para 60° nos graus de preenchimento a) 2% e b) 5%.

A espessura da camada passiva foi calculada pela diferença da posição radial, da partícula mais da próxima posição zero até o ponto de inflexão com a camada ativa. Já a espessura da camada ativa, foi calculada pela distância da posição radial do ponto de inflexão até a posição da última partícula, que delimita a superfície do leito.

Observa-se, na Figura 4.24, que para o ângulo de inclinação de 50° , quando se alterou o grau de preenchimento de 2% para 5% o ponto de inflexão mudou de 0,043 m para 0,066 m, enquanto para o ângulo de inclinação de 60° essa variação foi 0,037 para 0,060 m.

A Tabela 4.13 apresenta uma análise mais minuciosa da influência do grau de preenchimento na espessura das camadas ativa e passiva.

Tabela 4.13: Influência do grau de preenchimento na espessura da camada ativa e passiva para esferas de vidro.

Ângulo de Inclinação	Grau de Preenchimento (%)	Espessura da camada (m)	Razão (A/P)	
		Passiva (P)	Ativa (A)	(A/P)
50°	2	0,040	0,029	0,714
	5	0,063	0,046	0,727
60°	2	0,034	0,023	0,667
	5	0,057	0,034	0,600

Para o ângulo de inclinação de 50°, o aumento do grau de preenchimento praticamente não influenciou na relação entre as espessuras da camada passiva e ativa, ou seja, quando se aumentou o número de partículas, a distribuição das esferas de vidro foi praticamente igual entre as duas regiões. O mesmo não foi observado para o ângulo de 60°, onde houve uma redução de 10,04% na Razão (A/P), isso significa que a alteração do grau de preenchimento de 2 para 5% aumentou mais a espessura da camada passiva do que a da ativa.

A Tabela 4.14 é uma redisposição dos valores apresentados na Tabela 4.13. Essa modificação foi realizada, a fim de facilitar a comparação dos resultados e possibilitar uma análise semelhante para o ângulo de inclinação.

Tabela 4.14: Influência do ângulo de inclinação na espessura da camada ativa e passiva para esferas de vidro.

Grau de Preenchimento (%)	Ângulo de Inclinação	Espessura da camada (m)	Razão (A/P)	
		Passiva (P)	Ativa (A)	(A/P)
2	50	0,040	0,029	0,714
	60	0,034	0,023	0,667
5	50	0,063	0,046	0,727
	60	0,057	0,034	0,600

Nota-se que, com aumento do ângulo de inclinação de 50° para 60°, a espessura da camada passiva teve um aumento maior que o da camada ativa, resultando em uma diminuição de 6,58% e 17,47% na razão entre as camadas, para os graus de preenchimento de 2 e 5%, respectivamente. Quando se altera a inclinação de 50 para 60°, diminui-se a distribuição de partículas na base do equipamento, enquanto isso, aumenta-se quantidade de partículas presentes ao longo da borda do disco rotatório. Destaca-se que, a região ativa possui grande importância nas taxas de transferência de calor e massa, bem como na mistura e na segregação.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Com base nos objetivos propostos e diante dos resultados obtidos em uma dada faixa de ângulos de inclinação do disco rotatório, graus de preenchimento e velocidade de rotação utilizando diferentes materiais particulados, aliados aos estudos de simulação numérica por meio do Método dos elementos discretos, as principais conclusões do presente trabalho são apresentadas na sequência.

5.1. Conclusão

5.1.1. Estudos experimentais

- ✓ O coeficiente de atrito estático e de rolamento foi determinado aplicando uma metodologia adaptada da ASTM. Os valores de coeficiente de atrito estático da soja e do vidro foram semelhantes, já em relação ao coeficiente de atrito de rolamento a utilização da câmera de alta velocidade para determinação da distância percorrida da partícula, demonstrou ser uma excelente contribuição. Com as imagens do experimento, excluiu-se a necessidade da trajetória percorrida pela partícula ser estritamente retilínea e ainda possibilitou a medição do coeficiente para uma partícula irregular, como a soja;
- ✓ Investigou-se a influência do ângulo de inclinação do disco rotatório e da velocidade de rotação na retenção dos materiais particulados (*holdup* dos sólidos). Verificou-se que ambas variáveis independentes influenciaram significativamente no resultado analisado. O aumento da velocidade de rotação e a diminuição do grau de preenchimento contribuíram positivamente para a retenção de partículas dentro do equipamento. Verificou-se ainda que, a soja por apresentar um leito granular mais rígido e compactado teve menos partículas expelidas do disco rotatório, em comparação com as esferas de vidro;
- ✓ Pela metodologia de análise de imagens, observou-se que as variáveis grau de preenchimento, ângulo de inclinação e velocidade de rotação influenciaram na transição dos regimes de escoamento. Com o aumento do grau de preenchimento e a

diminuição do ângulo de inclinação foi necessária uma menor velocidade de rotação para alcançar os regimes;

- ✓ Pela primeira vez na literatura foi utilizado uma análise de acústica para a caracterização dos regimes de escoamento em um disco rotatório. A metodologia demonstrou ser bastante promissora, visto que ela conseguiu determinar o momento da transição do catarateamento para centrifugação, além de também conseguir identificar a mudança do regime de cascateamento-catarateamento para as partículas de soja. Pela análise de acústica ficou evidente que o regime de centrifugação inicia quando a primeira camada de partículas adere a parede do disco rotatório;
- ✓ Com as imagens dos regimes de escoamentos foi proposta, pela primeira vez, uma rede neural convolucional (CNN). A CNN demonstrou ser uma excelente ferramenta para a identificação dos regimes de escoamento, visto que ela apresentou um R^2 de 98%;
- ✓ Foram estudadas as aplicações dos principais modelos para predição da velocidade crítica de centrifugação encontrados na literatura. Nas condições operacionais testadas os modelos da literatura se demonstraram bastante limitados. Então, propôs-se uma modificação no modelo de Papadakis e Bombed (1961) com a inserção do grau de preenchimento. O novo modelo se adequou melhor aos resultados experimentais e apresentou uma média dos desvios de 14,27%;
- ✓ O ângulo de partida demonstrou estar diretamente relacionado com a transição dos regimes de escoamento, visto que ele sofreu as mesmas influências das condições operacionais;
- ✓ Foi analisado a velocidade das partículas, de soja e de vidro, na superfície do leito granular. O aumento da velocidade de rotação, do grau de preenchimento e a diminuição do ângulo de inclinação, aumentaram a dinâmica das partículas. Em relação ao tipo de material, verificou que as esferas de vidro, por apresentar uma melhor escoabilidade, tiveram velocidades superiores que das partículas de soja.

5.1.2. Estudos numéricos

- ✓ Foi realizado uma análise de sensibilidade dos parâmetros numéricos MED. Apesar de todos os coeficientes serem significativos, o coeficiente de atrito estático partícula-parede (μ_{Spw}) possui um efeito muito superior em relação aos demais. Foi verificado que quanto maior o valor de μ_{Spw} pior é o contato entre as partículas, o que prejudica a eficiência da granulação. Além desse resultado, o aumento do grau de preenchimento diminuiu o efeito de μ_{Spw} ;
- ✓ A análise numérica da influência das condições operacionais demonstrou que o grau de preenchimento, ângulo de inclinação e a velocidade de rotação possuem influência significativa no número de contato partícula-partícula. O aumento do grau de preenchimento contribui positivamente para o contato entre as partículas, enquanto a velocidade de rotação possui o efeito oposto;
- ✓ Na análise numérica dos regimes de escoamento verificou-se que, os valores dos parâmetros MED obtidos experimentalmente, não conseguiram reproduzir as condições analisadas, sendo necessário realizar um processo de calibração. Levando em consideração a análise de sensibilidade, optou-se por calibrar somente o coeficiente de atrito estático partícula-parede, preservando os valores obtidos experimentalmente dos demais parâmetros;
- ✓ Para as partículas de vidro, a maioria dos valores de μ_{Spw} , obtidos pelo processo de calibração, estiveram dentro do desvio padrão da medida experimental, ou seja, o seu significado físico também foi preservado. Para as partículas de soja verificou-se que o processo de calibração encontrou valores de μ_{Spw} distantes dos valores observados experimentalmente. Observou-se ainda que, somente a calibração do μ_{Spw} não foi suficiente para se reproduzir os resultados experimentais, sendo necessário a modificação de outros parâmetros MED. Uma análise mais minuciosa sobre o formato da partícula e do coeficiente de atrito estático partícula-partícula deve ser realizada.

- ✓ Quando o disco rotatório operou em regime de rolamento, observou-se a presença das camadas ativa e passiva no interior do leito granular. O aumento do grau de preenchimento e da velocidade de rotação aumentou a velocidade das partículas em ambas as camadas. Já a mudança do ângulo de inclinação atuou somente na velocidade da camada ativa.
- ✓ A partir da análise do ponto de inflexão, foi possível observar que somente o grau de preenchimento e/ou ângulo de inclinação alteraram a posição da interface da camada passiva com a ativa, não havendo influência da velocidade de rotação;
- ✓ O aumento do grau de preenchimento para a inclinação de 50° praticamente não alterou as espessuras das camadas, porém para o ângulo de inclinação de 60°, houve uma redução de 10,04% da camada ativa. Camada esta que é diretamente relacionada às taxas de transferência de massa, energia e momento;
- ✓ Quando a inclinação do disco rotatório mudou de 50° para 60°, as partículas se deslocaram para camada passiva, aumentando a sua espessura e diminuindo a região ativa.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- ✓ Aplicar a metodologia do coeficiente de atrito de rolamento para outras partículas irregulares, como ervilha, grão de bico, amaranto, entre outros, em diferentes rugosidades de superfície;
- ✓ Determinar o *holdup* dos sólidos, para outros tipos de materiais particulados, condições operacionais e propor uma equação para a sua predição;
- ✓ Analisar a transição dos regimes de escoamento para diferentes relações diâmetro/borda do disco rotatório e para materiais com diferentes tamanhos e densidades;
- ✓ Aplicar a técnica por acústica para determinar a transição dos regimes de escoamento para outros tipos de materiais e condições operacionais, tanto no disco rotatório quanto no tambor rotatório.

- ✓ Implementar uma rede neural, para caracterização dos regimes de escoamento pela análise da acústica;
- ✓ Analisar a segregação de partículas no disco rotatório, para diferentes condições operacionais e diferentes tamanhos e densidades do material particulado.
- ✓ Aplicar os resultados observados na análise da fluidodinâmica do material particulado em um processo real de granulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM G115 - 10. Standard guide for measuring and reporting friction coefficients. **American Society For Testing And Materials (ASTM)**, reapproved 2013, 2013.

ASTM G194 - 08. Standard test method for measuring rolling friction characteristics of a spherical shape on a flat horizontal plane. **American Society for Testing and Materials (ASTM)**, 2013.

AZRAR, H.; ZENTAR, R.; ABRIAK, N. E. The effect of granulation time of the pan granulation on the characteristics of the aggregates containing dunkirk sediments. **Procedia Engineering**, v. 143, p. 10-17, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.002>

BALL, F. D. Pelletizing before sintering: some experiments with a disc. **Journal of the iron and steel institute**, p. 40-55, 1959.

BLAU, P. J. **ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology**. Portland, EUA: ASM International, v. 18, 1992.

BOAC, J. M.; CASADA, M. E.; MAGHIRANG, R. G. Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 53, n. 4, p. 1201-1216, 2010.

<https://doi.org/10.13031/2013.32577>

BOUBEKER, B.; TALEA, M.; GOUDEAU, P.; COUPEAU, C.; GRILHE, J. On the Young modulus of 304 L stainless steel thin films. **Materials Characterization**, v. 45, n. 1, p. 33-37, 2000.

[https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(00\)00043-7](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(00)00043-7)

- BRANDAO, R. J.; LIMA, R. M.; SANTOS, R. L.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. Experimental study and DEM analysis of granular segregation in a rotating drum. **Powder Technology**, v. 364, p. 1-12, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.036>
- CAPES, C. E. **Particle Size Enlargement**. Elsevier, v. 1, n. C, p. 83-96, 1980.
- CHADWICK, P. C.; BRIDGWATER, J. Solids flow in dish granulators. **Chemical Engineering Science**, v. 52, n. 15, p. 2497-2509, 1997.
[https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(97\)00068-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(97)00068-7)
- CHADWICK, P. C.; ROUGH, S. L.; BRIDGWATER, J. *Holdup* and residence time distributions in inclined dishes. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 44, n. 19, p. 7529-7539, 2005.
<https://doi.org/10.1021/ie040252z>
- CHAI, X.; CHEN, L.; XUE, B.; LIU, E. Granulation of ammonium chloride fertilizer and agglomeration mechanism. **Powder Technology**, v. 319, p. 148-153, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.06.045>
- CHEN, H.; LIU, Y. L.; ZHAO, X. Q.; XIAO, Y. G.; LIU, Y. L. Numerical investigation on angle of repose and force network from granular pile in variable gravitational environments. **Powder Technology**, v. 283, p. 607-617, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.05.017>
- CHEN, S.; BAUMES, L. A.; GEL, A.; ADEPU, M.; EMADY, H.; JIAO, Y. Classification of particle height in a hopper bin from limited discharge data using convolutional neural network models. **Powder Technology**, v. 339, p. 615–624, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.08.048>
- CHUNG, Y. C.; OOI, J. Y. Influence of discrete element model parameters on bulk behavior of a granular solid under confined compression. **Particulate Science and Technology**, v. 26, n. 1, p. 83-96, 2008.
<https://doi.org/10.1080/02726350701759381>

- CLEARY, P. W.; SINNOTT, M. D. Assessing mixing characteristics of particle-mixing and granulation devices. **Particuology**, v. 6, n. 6, p. 419-444, 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.partic.2008.07.014>
- COETZEE, C. J. Particle upscaling: Calibration and validation of the discrete element method. **Powder Technology**, v. 344, p. 487-503, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.022>
- COETZEE, C. J. Review : calibration of the discrete element method review : calibration of the discrete element method the discrete element method (DEM) is used to model granular materials SC. **Powder Technology**, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.015>
- COETZEE, C. J.; ELS, D. N. J. Calibration of discrete element parameters and the modelling of silo discharge and bucket filling. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 65, n. 2, p. 198-212, 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.10.002>
- CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. **Géotechnique**, v. 29, n. 1, p. 47-65, 1979.
<https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
- CUNHA, R. N.; SANTOS, K. G.; LIMA, R. N.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. Repose angle of monoparticles and binary mixture: An experimental and simulation study. **Powder Technology**, v. 303, p. 203-211, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.09.023>
- DE OLIVEIRA, W. *Software para reconhecimento de espécies florestais a partir de imagens digitais de madeiras utilizando deep learning*. Dissertação de Mestrado – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Computacionais para o Agronegócio, p. 103, 2018.

DELELE, M. A.; WEIGLER, F.; FRANKE, G.; MELLMANN, J. Studying the solids and fluid flow behavior in rotary drums based on a multiphase CFD model. **Powder Technology**, v. 292, p. 260-271, 2016.

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

DUBÉ, O.; ALIZADEH, E.; CHAOUKI, J.; BERTRAND, F. Dynamics of non-spherical particles in a rotating drum. **Chemical Engineering Science**, v. 101, p. 486-502, 2013.

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.07.011>

ELSKAMP, F.; MANUEL, H. K.; ULRICH, H. A strategy to determine DEM parameters for spherical and non-spherical particles. **Granular Matter**, v. 19, n. 3, p. 1-13, 2017.

<https://doi.org/10.1007/s10035-017-0710-0>

FAYED, M. E., OTTEN, L. **Handbook of powder science & technology**. Nova Iorque, Springer, 1997.

<https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6373-0>

FRANKOWSKI, P.; MORGENEYER, M. Calibration and validation of DEM rolling and sliding friction coefficients in angle of repose and shear measurements. **AIP Conference Proceedings**, v. 1542, n. 2013, p. 851-854, 2013.

<https://doi.org/10.1063/1.4812065>

FUJIHASHI, D.; TSUNAZAWA, Y.; TAHARA, K.; TOKORO, C.; OWADA, S. DEM simulation of agglomerated particle behavior in pan-type pelletizer using liquid bridge model. **APCOM & ISCM**, 2013.

MARGHITU, D. B. **Mechanical engineer's handbook**. Academic Press, p. 880, 2001.

GONZÁLEZ-MONTELLANO, C.; FUENTES, J. M.; AYUGA-TÉLLEZ, E.; AYUGA, F. Determination of the mechanical properties of maize grains and olives required for use in DEM simulations. **Journal of Food Engineering**, v. 111, n. 4, p. 553-562, 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.03.017>

GONZÁLEZ-MONTELLANO, C.; RAMÍREZ, Á.; GALLEGOS, E.; AYUGA, F. Validation and experimental calibration of 3D discrete element models for the simulation of the discharge flow in silos. **Chemical Engineering Science**, v. 66, n. 21, p. 5116-5126, 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.07.009>

GOVENDER, I. Granular flows in rotating drums: A rheological perspective. **Minerals Engineering**, v. 92, p. 168-175, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.03.021>

GRIMA, A. P.; WYPYCH, P. W. Development and validation of calibration methods for discrete element modelling. **Granular Matter**, v. 13, n. 2, p. 127-132, 2011.

<https://doi.org/10.1007/s10035-010-0197-4>

HASSANPOUR, A.; PASHA, M. Discrete element method applications in process engineering. In: MARIANO MARTÍN MARTÍN (Ed.). . **Introduction to Software for Chemical Engineers**. Estados Unidos: CRC Press, p. 245-286, 2016.

<https://doi.org/10.1201/b17150-8>

HENEIN, H.; BRIMACOMBE, J. K.; WATKINSON, A. P. Experimental study of transverse bed motion in rotary kilns. **Metallurgical Transactions B**, v. 14, n. 2, p. 191-205, 1983.

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

HLOSTA, J.; JEZERSKÁ, L.; ROZBROJ, J.; ŽUROVEC, D.; NEČAS, J.; ZEGZULKA, J. DEM investigation of the influence of particulate properties and operating conditions on the mixing process in rotary drums: part 2-process validation and experimental study. **Processes**, v. 8, n. 2, p. 184, 2020.

<https://doi.org/10.3390/pr8020184>

HLOSTA, J.; ŽUROVEC, D.; ROZBROJ, J.; RAMÍREZ-GÓMEZ, Á.; NEČAS, J.; ZEGZULKA, J. Experimental determination of particle-particle restitution coefficient via double pendulum method. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 135, n. May 2018, p. 222-233, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.05.016>

- ISHIBASHI, I.; PERRY, C.; AGARWAL, T. K. Experimental determinations of contact friction for spherical glass particles. **Soils and Foundations**, v. 34, n. 4, p. 79-84, 1994.
https://doi.org/10.3208/sandf1972.34.4_79
- JUST, S.; TOSCHKOFF, G.; FUNKE, A.; DJURIC, D.; SCHARRER, G.; KHINAST, J.; KNOP, K.; KLEINEBUDDE, P. Experimental analysis of tablet properties for discrete element modeling of an active coating process. **AAPS PharmSciTech**, v. 14, n. 1, p. 402-11, 2013.
<https://doi.org/10.1208/s12249-013-9925-5>
- KETTERHAGEN, W. R.; BHARADWAJ, R.; HANCOCK, B. C. The coefficient of rolling resistance (CoRR) of some pharmaceutical tablets. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 392, n. 1-2, p. 107-110, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2010.03.039>
- KHAN, G. M. Artificial neural network (ANNs). **Studies in Computational Intelligence**, v. 725, p. 39-55, 2018.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-67466-7_4
- KHAN, S.; RAHMANI, H.; SHAH, S. A. A.; BENNAMOUN, M. **A Guide to Convolutional Neural Networks for Computer Vision**. Synthesis Lectures on Computer Vision, v. 8, n. 1, p. 1–207, 2018.
<https://doi.org/10.2200/s00822ed1v01y201712cov015>
- LIAO, Z.; YANG, Y.; SUN, C.; WU, R.; DUAN, Z.; WANG, Y.; LI, X.; XU, J. Image-based prediction of granular flow behaviors in a wedge-shaped hopper by combining DEM and deep learning methods. **Powder Technology**, v. 383, p. 159–166, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.01.041>
- LITSTER, J.; ENNIS, B. **The Science and Engineering of Granulation Processes**. Dordrecht: Springer Netherlands, v. 15, 2004.
<https://doi.org/10.1007/978-94-017-0546-2>

MACHADO, M. V. C.; SANTOS, D. A.; BARROZO, M. A. S.; DUARTE, C. R. Experimental and numerical study of grinding media flow in a mall mill. **Chemical Engineering and Technology**, v. 40, n. 10, p. 1835-1843, 2017.

<https://doi.org/10.1002/ceat.201600508>

MAKISHIMA, A.; MACKENZIE, J. D. Calculation of bulk modulus, shear modulus and Poisson's ratio of glass. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 17, n. 2, p. 147-157, 1975.

[https://doi.org/10.1016/0022-3093\(75\)90047-2](https://doi.org/10.1016/0022-3093(75)90047-2)

MARIGO, M.; STITT, E. H. Discrete 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, p. 236-252, 2015.

<https://doi.org/10.14356/kona.2015016>

MARINACK JR., M. C.; MUSGRAVE, R. E.; HIGGS, C. F. Experimental investigations on the coefficient of restitution of single particles. **Tribology Transactions**, v. 56, n. 4, p. 572-580, 2013.

<https://doi.org/10.1080/10402004.2012.748233>

MATUTTIS, H. G.; CHEN, J. **Understanding the discrete element method: simulation of non-spherical particles for granular and multi-body systems**. John Wiley & Sons, 2014.

<https://doi.org/10.1002/9781118567210>

MELLMANN, J. The transverse motion of solids in rotating cylinders-forms of motion and transition behavior. **Powder Technology**, v. 118, n. 3, p. 251-270, 2001.

[https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(00\)00402-2](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(00)00402-2)

MUELLER, P.; BOETTCHER, R.; RUSSELL, A.; TRUEE, M.; TOMAS, J. A novel approach to evaluate the elastic impact of spheres on thin plates. **Chemical Engineering Science**, v. 138, p. 689-697, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.08.056>

MÜLLER, P.; BÖTTCHER, R.; RUSSELL, A.; TRÜE, M.; AMAN, S.; TOMAS, J. Contact time at impact of spheres on large thin plates. **Advanced Powder Technology**, v. 27, n. 4, p. 1233-1243, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.apt.2016.04.011>

NASCIMENTO, S. M. **Estudo da dinâmica de partículas em tambor rotatório com suspensores: análise experimental e numérica utilizando abordagens euleriana e lagrangeana**. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, p. 108, 2018.

OBRANIAK, A.; LAWINSKA, K. Spectrophotometric analysis of disintegration mechanisms (abrasion and crushing) of agglomerates during the disc granulation of dolomite. **Granular Matter**, v. 20, n. 1, p. 1-10, 2018.

<https://doi.org/10.1007/s10035-017-0777-7>

PEÇANHA, R. P.; MASSARANI, G. Dimensão característica e forma de partículas. **XIV Encontro sobre escoamento em meios porosos**. Anais...Campinas: 1986

PEDRYCZ, W.; CHEN, S. **Deep learning: algorithms and applications**. Cham: Springer International Publishing, p. 865, 2020.

<https://doi.org/10.1007/978-3-030-31760-7>

PENHA, D. P. **Rede neural convolucional aplicada à identificação de equipamentos residenciais para sistemas de monitoramento nãointrusivo de carga**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, p. 71, 2018.

PIETSCH, W. B. **Size enlargement by agglomeration**. In: Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, p. 544, 1991.

POPOV, V. L. **Coulomb's Law of Friction**. In: Contact Mechanics and Friction. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 133-154.

https://doi.org/10.1007/978-3-642-10803-7_10

POTYONDY, D. O.; CUNDALL, P. A. A bonded-particle model for rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 41, n. 8 SPEC.ISS., p. 1329-1364, 2004.

<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.09.011>

RACKL, M.; HANLEY, K. J. A methodical calibration procedure for discrete element models. **Powder Technology**, v. 307, p. 73-83, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.11.048>

RAY CHAUDHURI, S.; HUTCHINSON, T. C. Characterizing frictional behavior for use in predicting the seismic response of unattached equipment. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 25, n. 7-10, p. 591-604, 2005.

<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.11.022>

REHDER, A. P. B. **Estudo do processo de extração e granulação de um blend de chás**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, p. 112, 2019.

RESENDE, I. A.; MACHADO, M. V. C.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. An experimental analysis of coffee beans dynamics in a rotary drum. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 95, n. 12, p. 2239-2248, 2017.

<https://doi.org/10.1002/cjce.22961>

RUTGERS, R. Longitudinal mixing of granular material flowing through a rotating cylinder. Part II. Experimental. **Chemical Engineering Science**, v. 20, n. 12, p. 1089-1100, 1965.

[https://doi.org/10.1016/0009-2509\(65\)80112-9](https://doi.org/10.1016/0009-2509(65)80112-9)

SANTOMASO, A. C. C.; DING, Y. L. L.; LICKISS, J. R. R.; YORK, D. W. W. Investigation of the granular behaviour in a rotating drum operated over a wide range of rotational speed. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 81, n. 8, p. 936-945, 2003.

<https://doi.org/10.1205/026387603322482176>

SANTOS, D A; BARROZO, M. A. S.; DUARTE, C. R.; WEIGLER, F.; MELLMANN, J. Investigation of particle dynamics in a rotary drum by means of experiments and

numerical simulations using DEM. **Advanced Powder Technology**, v. 27, n. 2, p. 692-703, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.apt.2016.02.027>

SANTOS, D. A.; DADALTO, F. O.; SCATENA, R.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. A hydrodynamic analysis of a rotating drum operating in the rolling regime. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 94, n. August, p. 204-212, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.07.028>

SANTOS, D. A.; PETRI, I. J.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. Experimental and CFD study of the hydrodynamic behavior in a rotating drum. **Powder Technology**, v. 250, p. 52-62, 2013.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.10.003>

SANTOS, D. A.; SCATENA, R.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. Transition phenomenon investigation between different flow regimes in a rotary drum. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 33, n. 3, p. 491-501, 2016.

<https://doi.org/10.1590/0104-6632.20160333s20150128>

SAMMUT, C.; WEBB, G. **Encyclopedia of machine learning**. Springer, p. 1061, 2010.

<https://doi.org/10.1007/978-0-387-30164-8>

SEVILLE, J.; WU, C. Y. **Particle Technology and Engineering an Engineer's Guide to Particles and Powders: Fundamentals and Computational Approaches**. Butterworth-Heinemann, p. 294, 2016.

<https://doi.org/10.1016/C2011-0-05764-2>

SHERITT, R. G.; CHAOUKI, J.; MEHROTRA, A. K.; BEHIE, L. A. Axial dispersion in the three-dimensional mixing of particles in a rotating drum reactor. **Chemical Engineering Science**, v. 58, n. 2, p. 401-415, 2003.

[https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(02\)00551-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00551-1)

SILVÉRIO, B. C.; SANTOS, K. G.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. Effect of the friction, elastic, and restitution coefficients on the fluid dynamics behavior of a rotary

dryer operating with fertilizer. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 21, p. 8920-8926, 2014.

<https://doi.org/10.1021/ie404220h>

SINGH, P.; MANURE, A. **Learn TensorFlow 2.0**. Berkeley, CA: Apress, 2020.

<https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5558-2>

SONDERGAARD, R.; CHANEY, K.; BRENNEN, C. E. Measurements of solid spheres bouncing off flat plates. **Journal of Applied Mechanics**, Transactions ASME, v. 57, n. 3, p. 694-699, 1990.

<https://doi.org/10.1115/1.2897079>

SULLIVAN, C. O. Particle-based discrete element modeling: geomechanics perspective. **International Journal of Geomechanics**, v. 11, p. 1-16, 2011.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000024](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000024)

THARWAT, A. Classification assessment method. **Applied Computing and Informatics**, v. 17, n. 1, p. 168-192, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.aci.2018.08.003>

VARGAS, A. C. G.; CARVALHO, A. M. P.; VASCONCELOS, C. N. Um estudo sobre redes neurais convolucionais e sua aplicação em detecção de pedestres. **SIBGRAPI – XXIX Conference on Graphics, Patterns and Images**, São José dos Campos, 2016.

VIEIRA NETO, J. L.; COSTA, D. D. L.; SOUZA, L. V.; PIRES, R. F.; SOUZA, D. L.; SILVÉRIO, B. C.; SANTOS, K. G. DOS. A Fluid Dynamic Study in a Rotating Disk Applied in Granulation of Fertilizers. **Materials Science Forum**, v. 899, p. 142-147, 2017.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.899.142>

VU-QUOC, L.; ZHANG, X.; WALTON, O. R. A 3-D discrete-element method for dry granular flows of ellipsoidal particles. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 187, n. 3-4, p. 483-528, 2000.

[https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(99\)00337-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(99)00337-0)

- WALKER, G. M. Chapter 4: Drum Granulation Processes. **Handbook of Powder Technology**.
Elsevier, 2007. v. 11p. 219-254.
[https://doi.org/10.1016/S0167-3785\(07\)80039-X](https://doi.org/10.1016/S0167-3785(07)80039-X)

APÊNDICE A

Rede neural convolucional

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import tensorflow as tf
from tensorflow import keras
from tensorflow.keras import layers
from matplotlib.image import imread
import cv2
from utils import inputTransform
train_dir = r"imagens/train"
val_dir = r"imagens/val"
cascata_train_dir = train_dir + '/cascata'
catarata_train_dir = train_dir + '/catarata'
centrifugacao_train_dir = train_dir + '/centrifugacao'
rolamento_train_dir = train_dir + '/rolamento'
cascata_val_dir = val_dir + '/cascata'
catarata_val_dir = val_dir + '/catarata'
centrifugacao_val_dir = val_dir + '/centrifugacao'
rolamento_val_dir = val_dir + '/rolamento'
batch_size = 32
img_height = 168
img_width = 168
class_names = ['cascata', 'catarata', 'centrifugacao',
'rolamento']
num_classes = len(class_names)
def loadImagesInPath(path : str):
    ret_vec = []
    for file in os.listdir(path):
        if file.endswith(".jpg"):
            ret_vec.append(imread(os.path.join(path, file)))
    return np.asarray(ret_vec)
```

```

cascata_train = loadImagesInPath(cascata_train_dir)
catarata_train = loadImagesInPath(cataraata_train_dir)
centrifugacao_train = loadImagesInPath(centrifugacao_train_dir)
rolamento_train = loadImagesInPath(rolamento_train_dir)
cascata_val = loadImagesInPath(cascata_val_dir)
catarata_val = loadImagesInPath(cataraata_val_dir)
centrifugacao_val = loadImagesInPath(centrifugacao_val_dir)
rolamento_val = loadImagesInPath(rolamento_val_dir)
cascata_train_label = np.full((cascata_train.shape[0], 1), 0)
catarata_train_label = np.full((cataraata_train.shape[0], 1), 1)
centrifugacao_train_label = np.full((centrifugacao_train.shape[0], 1), 2)
rolamento_train_label = np.full((rolamento_train.shape[0], 1), 3)
cascata_val_label = np.full((cascata_val.shape[0], 1), 0)
catarata_val_label = np.full((cataraata_val.shape[0], 1), 1)
centrifugacao_val_label = np.full((centrifugacao_val.shape[0], 1), 2)
rolamento_val_label = np.full((rolamento_val.shape[0], 1), 3)
x_train = np.concatenate((cascata_train,
                           catarata_train,
                           centrifugacao_train,
                           rolamento_train), axis=0)
y_train_m = np.concatenate((cascata_train_label,
                           catarata_train_label,
                           centrifugacao_train_label,
                           rolamento_train_label), axis=0)
x_val = np.concatenate((cascata_val,
                           catarata_val,
                           centrifugacao_val,
                           rolamento_val), axis=0)
y_val_m = np.concatenate((cascata_val_label,
                           catarata_val_label,

```

```

                centrifugacao_val_label,
                rolamento_val_label), axis=0)

def unison_shuffled_copies(a, b):
    assert len(a) == len(b)
    p = np.random.permutation(len(a))
    return a[p], b[p]

x_train, y_train_m = unison_shuffled_copies(x_train, y_train_m)
x_val, y_val_m = unison_shuffled_copies(x_val, y_val_m)
index = 701
img = x_train[index]
plt.imshow(x_train[index])
print(class_names[y_train_m[index][0]])
x_train_transformed = inputTransform(x_train)
x_val_transformed = inputTransform(x_val)
plt.imshow(x_train_transformed[666], cmap=plt.cm.gray)
y_train = tf.keras.utils.to_categorical(y_train_m)
y_val = tf.keras.utils.to_categorical(y_val_m)
y_train

if carregar_modelo:
    model = tf.keras.models.load_model('nome')
else:
    model = tf.keras.Sequential([layers.Conv2D(32, (3, 3),
activation='relu', input_shape=(168, 168, 3)),
    layers.MaxPooling2D((2, 2)),
    layers.Conv2D(64, (3, 3), activation='relu'),
    layers.MaxPooling2D((2, 2)),
    layers.Conv2D(64, (3, 3), activation='relu'),
    layers.Flatten(),
    layers.Dense(250, activation='relu'),
    layers.Dense(num_classes, activation='softmax')
])
model.compile( loss='categorical_crossentropy',
optimizer='adam',
metrics=['accuracy']))

```

```
if not carregar_modelo:  
    hist = model.fit(x_train_transformed, y_train,  
                      batch_size = 256,  
                      epochs = 6)  
  
def predFun(img):  
    pred = model.predict(inputTransform(np.asarray([img])))  
    class_index = int(np.argmax(pred[0]))  
    print("{} - {:.2f}%".format(class_names[class_index],  
                                np.max(pred)*100.0 ))  
    print(pred[0]*100.)  
    print(class_names)  
evaluate_res = model.evaluate(x_val_transformed, y_val)  
img = imread('cascata.jpg')  
plt.imshow(img)  
predFun(img)
```

APÊNDICE B

Planejamento Composto Central para o ângulo de inclinação

	e_{pp}	e_{pw}	μ_{Spp}	μ_{Spw}	μ_{Rpp}	μ_{Rpw}	Nc_{pp-40°	Nc_{pp-50°	Nc_{pp-60°
1	0,250	0,250	0,250	0,250	0,025	0,025	1,887	2,164	2,270
2	0,250	0,250	0,250	0,250	0,075	0,075	2,183	2,227	2,332
3	0,250	0,250	0,250	0,750	0,025	0,075	1,421	1,472	1,476
4	0,250	0,250	0,250	0,750	0,075	0,025	1,421	1,504	1,524
5	0,250	0,250	0,750	0,250	0,025	0,075	1,962	2,056	2,035
6	0,250	0,250	0,750	0,250	0,075	0,025	1,878	1,926	1,987
7	0,250	0,250	0,750	0,750	0,025	0,025	1,166	1,191	1,192
8	0,250	0,250	0,750	0,750	0,075	0,075	1,185	1,143	1,143
9	0,250	0,750	0,250	0,250	0,025	0,075	1,997	2,223	2,292
10	0,250	0,750	0,250	0,250	0,075	0,025	2,126	2,217	2,288
11	0,250	0,750	0,250	0,750	0,025	0,025	1,479	1,541	1,533
12	0,250	0,750	0,250	0,750	0,075	0,075	1,373	1,453	1,470
13	0,250	0,750	0,750	0,250	0,025	0,025	1,914	2,060	2,122
14	0,250	0,750	0,750	0,250	0,075	0,075	1,903	1,951	1,988
15	0,250	0,750	0,750	0,750	0,025	0,075	1,148	1,163	1,164
16	0,250	0,750	0,750	0,750	0,075	0,025	1,180	1,182	1,171
17	0,750	0,250	0,250	0,250	0,025	0,075	1,929	2,190	2,160
18	0,750	0,250	0,250	0,250	0,075	0,025	2,139	2,265	2,363
19	0,750	0,250	0,250	0,750	0,025	0,025	1,306	1,369	1,370
20	0,750	0,250	0,250	0,750	0,075	0,075	1,213	1,256	1,303
21	0,750	0,250	0,750	0,250	0,025	0,025	1,922	2,058	2,069
22	0,750	0,250	0,750	0,250	0,075	0,075	1,906	1,964	1,930
23	0,750	0,250	0,750	0,750	0,025	0,075	0,996	1,005	1,010
24	0,750	0,250	0,750	0,750	0,075	0,025	1,064	1,082	1,108
25	0,750	0,750	0,250	0,250	0,025	0,025	1,786	2,083	2,245
26	0,750	0,750	0,250	0,250	0,075	0,075	2,181	2,263	2,366
27	0,750	0,750	0,250	0,750	0,025	0,075	1,245	1,273	1,301

Continua

	ℓ_{pp}	ℓ_{pw}	μ_{Spp}	μ_{Spw}	μ_{Rpp}	μ_{Rpw}	Nc_{pp-40°	Nc_{pp-50°	Nc_{pp-60°
28	0,750	0,750	0,250	0,750	0,075	0,025	1,279	1,326	1,358
29	0,750	0,750	0,750	0,250	0,025	0,075	1,955	2,062	2,070
30	0,750	0,750	0,750	0,250	0,075	0,025	1,870	1,934	1,971
31	0,750	0,750	0,750	0,750	0,025	0,025	1,012	1,030	1,026
32	0,750	0,750	0,750	0,750	0,075	0,075	1,060	1,030	1,043
33	0,054	0,500	0,500	0,500	0,050	0,050	1,438	1,474	1,489
34	0,946	0,500	0,500	0,500	0,050	0,050	1,120	1,160	1,176
35	0,500	0,054	0,500	0,500	0,050	0,050	1,295	1,338	1,346
36	0,500	0,946	0,500	0,500	0,050	0,050	1,292	1,312	1,325
37	0,500	0,500	0,054	0,500	0,050	0,050	1,383	1,452	1,486
38	0,500	0,500	0,946	0,500	0,050	0,050	1,118	1,161	1,198
39	0,500	0,500	0,500	0,054	0,050	0,050	2,165	2,186	2,239
40	0,500	0,500	0,500	0,946	0,050	0,050	1,139	1,173	1,199
41	0,500	0,500	0,500	0,500	0,005	0,050	1,293	1,302	1,315
42	0,500	0,500	0,500	0,500	0,095	0,050	1,317	1,385	1,394
43	0,500	0,500	0,500	0,500	0,050	0,005	1,312	1,374	1,373
44	0,500	0,500	0,500	0,500	0,050	0,095	1,242	1,281	1,300
45	0,500	0,500	0,500	0,500	0,050	0,050	1,296	1,319	1,346

Planejamento Composto Central para o grau de preenchimento

	e_{pp}	e_{pw}	μ_{Spp}	μ_{Spw}	μ_{Rpp}	μ_{Rpw}	$Nc_{pp-2\%}$	$Nc_{pp-5\%}$	$Nc_{pp-8\%}$
1	0,250	0,250	0,250	0,250	0,025	0,025	1,887	1,935	1,918
2	0,250	0,250	0,250	0,250	0,075	0,075	2,183	2,096	2,038
3	0,250	0,250	0,250	0,750	0,025	0,075	1,421	1,631	1,766
4	0,250	0,250	0,250	0,750	0,075	0,025	1,421	1,641	1,761
5	0,250	0,250	0,750	0,250	0,025	0,075	1,962	1,851	1,682
6	0,250	0,250	0,750	0,250	0,075	0,025	1,878	1,921	1,869
7	0,250	0,250	0,750	0,750	0,025	0,025	1,166	1,397	1,522
8	0,250	0,250	0,750	0,750	0,075	0,075	1,185	1,402	1,508
9	0,250	0,750	0,250	0,250	0,025	0,075	1,997	1,854	1,863
10	0,250	0,750	0,250	0,250	0,075	0,025	2,126	2,087	2,054
11	0,250	0,750	0,250	0,750	0,025	0,025	1,479	1,691	1,785
12	0,250	0,750	0,250	0,750	0,075	0,075	1,373	1,603	1,752
13	0,250	0,750	0,750	0,250	0,025	0,025	1,914	1,809	1,685
14	0,250	0,750	0,750	0,250	0,075	0,075	1,903	1,925	1,861
15	0,250	0,750	0,750	0,750	0,025	0,075	1,148	1,385	1,515
16	0,250	0,750	0,750	0,750	0,075	0,025	1,180	1,404	1,515
17	0,750	0,250	0,250	0,250	0,025	0,075	1,929	1,711	1,726
18	0,750	0,250	0,250	0,250	0,075	0,025	2,139	2,055	1,915
19	0,750	0,250	0,250	0,750	0,025	0,025	1,306	1,538	1,645
20	0,750	0,250	0,250	0,750	0,075	0,075	1,213	1,454	1,617
21	0,750	0,250	0,750	0,250	0,025	0,025	1,922	1,726	1,558
22	0,750	0,250	0,750	0,250	0,075	0,075	1,906	2,001	1,852
23	0,750	0,250	0,750	0,750	0,025	0,075	0,996	1,264	1,405
24	0,750	0,250	0,750	0,750	0,075	0,025	1,064	1,344	1,461
25	0,750	0,750	0,250	0,250	0,025	0,025	1,786	1,801	1,799
26	0,750	0,750	0,250	0,250	0,075	0,075	2,181	2,087	1,907
27	0,750	0,750	0,250	0,750	0,025	0,075	1,245	1,483	1,633
28	0,750	0,750	0,250	0,750	0,075	0,025	1,279	1,474	1,637

Continua

	ℓ_{pp}	ℓ_{pw}	μ_{Spp}	μ_{Spw}	μ_{Rpp}	μ_{Rpw}	$Nc_{pp-2\%}$	$Nc_{pp-5\%}$	$Nc_{pp-8\%}$
29	0,750	0,750	0,750	0,250	0,025	0,075	1,955	1,773	1,550
30	0,750	0,750	0,750	0,250	0,075	0,025	1,870	2,005	1,843
31	0,750	0,750	0,750	0,750	0,025	0,025	1,012	1,260	1,411
32	0,750	0,750	0,750	0,750	0,075	0,075	1,060	1,333	1,439
33	0,054	0,500	0,500	0,500	0,050	0,050	1,438	1,640	1,759
34	0,946	0,500	0,500	0,500	0,050	0,050	1,120	1,299	1,452
35	0,500	0,054	0,500	0,500	0,050	0,050	1,295	1,412	1,545
36	0,500	0,946	0,500	0,500	0,050	0,050	1,292	1,414	1,543
37	0,500	0,500	0,054	0,500	0,050	0,050	1,383	1,701	1,872
38	0,500	0,500	0,946	0,500	0,050	0,050	1,118	1,315	1,436
39	0,500	0,500	0,500	0,054	0,050	0,050	2,165	2,455	2,442
40	0,500	0,500	0,500	0,946	0,050	0,050	1,139	1,396	1,531
41	0,500	0,500	0,500	0,500	0,005	0,050	1,293	1,473	1,585
42	0,500	0,500	0,500	0,500	0,095	0,050	1,317	1,434	1,548
43	0,500	0,500	0,500	0,500	0,050	0,005	1,312	1,425	1,545
44	0,500	0,500	0,500	0,500	0,050	0,095	1,242	1,400	1,537
45	0,500	0,500	0,500	0,500	0,050	0,050	1,296	1,413	1,541

APÊNDICE C

Planejamento Composto Central para as condições operacionais

	G.P (%)	A.I (°)	V.R (RPM)	Nc_{pp}
1	2,00	40,00	10,00	1,31
2	2,00	40,00	30,00	0,79
3	2,00	60,00	10,00	1,34
4	2,00	60,00	30,00	0,86
5	8,00	40,00	10,00	1,59
6	8,00	40,00	30,00	1,15
7	8,00	60,00	10,00	1,65
8	8,00	60,00	30,00	1,26
9	0,59	50,00	20,00	0,71
10	9,41	50,00	20,00	1,42
11	5,00	35,29	20,00	1,19
12	5,00	64,71	20,00	1,28
13	5,00	50,00	5,29	1,73
14	5,00	50,00	34,71	1,03
15	5,00	50,00	20,00	1,29
16	5,00	50,00	20,00	1,29
17	5,00	50,00	20,00	1,29
18	5,00	50,00	20,00	1,29
19	5,00	50,00	20,00	1,29

APÊNDICE D

Planejamento 3^k para avaliar a influência das condições operacionais na máxima força de colisão.

GP (%)	AI (°)	VR (RPM)	$F_{C,\max}$
2	40	10	1,10
2	40	30	1,52
2	40	50	1,98
2	50	10	1,21
2	50	30	1,33
2	50	50	1,62
2	60	10	1,18
2	60	30	1,72
2	60	50	1,93
5	40	10	1,24
5	40	30	1,46
5	40	50	2,31
5	50	10	1,21
5	50	30	1,43
5	50	50	1,80
5	60	10	1,45
5	60	30	1,91
5	60	50	1,72
8	40	10	1,35
8	40	30	1,74
8	40	50	2,91
8	50	10	1,55
8	50	30	1,49
8	50	50	1,68
8	60	10	1,52
8	60	30	1,50
8	60	50	1,75