



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



**ESTUDO DA DINÂMICA DE ESCOAMENTO DA UNIDADE**  
***MICROWAVE PADDLE DRYER***

**Leonardo Lima de Carvalho**

**Uberlândia - MG**

**2021**



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



**ESTUDO DA DINÂMICA DE ESCOAMENTO DA UNIDADE**  
***MICROWAVE PADDLE DRYER***

Leonardo Lima de Carvalho

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Marina Seixas Pereira

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, na área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

**Uberlândia - MG**

**2021**

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

C331 2021	<p>Carvalho, Leonardo Lima de, 1995- Estudo da dinâmica de escoamento da unidade Microwave Paddle Dryer [recurso eletrônico] / Leonardo Lima de Carvalho. - 2021.</p> <p>Orientadora: Marina Seixas Pereira. Coorientador: Carlos Henrique Ataíde. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Química. Modo de acesso: Internet. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.679">http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.679</a> Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia química. I. Pereira, Marina Seixas, 1985- , (Orient.). II. Ataíde, Carlos Henrique, 1956- , (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Química. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 66.0</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



## ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 21/2021, PPGEQ				
Data:	13 de dezembro de 2021	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	10:29
Matrícula do Discente:	11922EQU008				
Nome do Discente:	Leonardo Lima de Carvalho				
Título do Trabalho:	Estudo da dinâmica de escoamento da unidade Microwave Paddle Dryer				
Área de concentração:	Desenvolvimento de Processos Químicos				
Linha de pesquisa:	Processos de Separação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Otimização da separação sólido-líquido na perfuração de poços de petróleo e gás e modelagem e simulação numérica de escoamentos de fluidos em seções anulares				

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Rodrigo Béttega - DEQ/UFSCar; Marcos Antonio de Souza Barrozo - PPGEQ/UFU e Claudio Roberto Duarte - PPGEQ/UFU.

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(às) 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 Mestre.

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 **Claudio Roberto Duarte**,



**Professor(a) do Magistério Superior**, em 13/12/2021, às 16:10, 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 **Rodrigo Béttega, Usuário Externo**, em 13/12/2021, às 16:23, 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 13/12/2021, às 16:24, 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](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3254082** e o código CRC **C89543FB**.

---

*Ao meu coorientador e amigo Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde, que teve fundamental importância no desenvolvimento desse trabalho e em minha formação pessoal e profissional. Desde o início, deu-me forças para superar as adversidades, acreditou em meu potencial e inspirou o bom ânimo para o desenvolvimento do projeto.*

*Esteja com Deus, querido amigo.*

---

## AGRADECIMENTOS

---

Agradeço primeiramente a Deus, esse Pai bondoso e amoroso que nos ama infinitamente, que me permitiu essa oportunidade, no campo da vida, para o aprimoramento das minhas virtudes e reconhecimento das inúmeras imperfeições, que diariamente busco saná-las.

Aos meus pais, Lino Antônio e Ana Cláudia, por tudo que já recebi e continuo recebendo de valores morais e pela confiança depositada em minhas escolhas. Agradeço ao meu irmão e cunhada, Lino de Carvalho e Marcela Sanches, pelo apoio incondicional.

À minha companheira, Fernanda Machado, que todos os dias me ensina sobre o verdadeiro significado do amor e da cumplicidade. Desde o início me apoiou e deu-me forças para nunca desistir. Sua bondade, generosidade, paciência e zelo foram essenciais nos últimos anos e essa conquista é nossa.

Agradecimento especial à minha orientadora Prof. Dr. Marina Seixas Pereira, que é, para mim, uma fonte de inspiração profissional e pessoal. Serei eternamente grato pela sua palavra de coragem, de paciência e de fortaleza.

Agradeço imensamente ao Prof. Dr. Rodolfo Junqueira Brandão, imprescindível nesse trabalho, que me acompanhou desde o início do projeto e me ensinou, para além da parte técnica, sobre humildade e paciência. Agradeço imensamente ao Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte, que auxiliou no projeto tanto no início quanto no final.

Ao amigo Vinícius Pimenta, principal companheiro de projeto, pela ajuda nos testes, pela palavra amiga de sempre, e pelo exemplo de dedicação e trabalho. Menção aos demais amigos de laboratório, que ajudaram de forma direta ou indireta: Ana Carolina, Heitor, Marcus, Gabriela Nunes, Gabriela Gil, Anderson, José Alair, Rafael Heilbut, entre outros.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFU, pela assistência e estrutura disponibilizadas.

Agradeço a CAPES e a PETROBRÁS pelo apoio financeiro destinado a esse trabalho.

E por último, um agradecimento eterno ao meu amigo e coorientador Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde. Obrigado por sempre acreditar em mim, Carlão, e por tudo que já me ensinou. Descanse em paz, querido amigo.

*“Porque já é manifesto que sois a carta do Cristo, ministrada por nós, e escrita, não com tinta, mas com o Espírito de Deus Vivo, não em tábuas de pedra, mas nas tábuas de carne do coração.” Paulo. (2ª Epístola aos Coríntios, Capítulo 3, versículo 3.)*

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>I</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>III</b>
<b>LISTA DE SIMBOLOS .....</b>	<b>IV</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>VIII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IX</b>
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo Geral .....	3
1.2 Objetivos Específicos .....	3
<b>CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
2.1 Equipamentos <i>Paddle Dryer</i> .....	4
2.2 Aplicações da abordagem Lagrangeana em Equipamentos <i>Paddle</i> .....	7
2.3 Abordagem Numérica.....	11
2.4 Abordagem Lagrangeana – Método dos Elementos Discretos (DEM) .....	11
2.4.1 <i>Modelo de Contato</i> .....	13
2.4.2 <i>Tempo de Integração</i> .....	15
2.5 Parâmetros DEM .....	16
2.5.1 <i>Coefficiente de Restituição</i> .....	16
2.5.2 <i>Coefficiente de Atrito Estático</i> .....	18
2.5.3 <i>Coefficiente de Atrito de Rolamento</i> .....	20
<b>CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>23</b>
3.1 Unidade Experimental: <i>Microwave Paddle Dryer</i> .....	23
3.2 Material e Caracterização .....	25
3.3 Abordagem Numérica Lagrangeana .....	26
3.4 Calibração dos parâmetros.....	27
3.5 Estudos das variáveis relevantes para o processo .....	31

<b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>34</b>
4.1 Resultado da calibração dos parâmetros DEM .....	34
4.2 Velocidade média das partículas .....	38
4.3 Velocidade média das partículas por região .....	44
4.4 Aplicação dos resultados no processo de secagem .....	50
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>52</b>
5.1 Conclusões .....	52
5.1.1 <i>Calibração dos parâmetros</i> .....	52
5.1.2 <i>Análise quantitativa da velocidade média do leito</i> .....	52
5.1.3 <i>Análise quantitativa da velocidade média por região:</i> .....	53
5.2 Sugestão para trabalhos futuros .....	53
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>54</b>

---

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2-1: Secador comercial tipo <i>Paddle Dryer</i> . (Adaptado de SANTOS, 2018).....	4
Figura 2-2: Representação do <i>Microwave Paddle Dryer</i> (MPD) (SANTOS, 2018).....	7
Figura 2-3: Quantidade de artigos publicados no <i>science direct</i> sobre <i>Paddle Dryer</i> .....	10
Figura 2-4: Algoritmo empregado nas simulações DEM (adaptado de LIMA, 2017).....	12
Figura 2-5: Propagação da onda de Rayleigh (BRANDÃO, 2017) .....	15
Figura 2-6: Colisão Perfeitamente Inelástica e Colisão Perfeitamente Elástica (Adaptado de BRANDÃO, 2019).....	17
Figura 2-7: Impacto oblíquo de uma partícula (Adaptado de DIAS & BARROSO <i>et al.</i> , 2006) .....	18
Figura 2-8: Representação do sistema tipo “trenó” (Adaptado de BRANDÃO, 2019) .....	19
Figura 2-9: Diagrama de forças de uma esfera em movimento (Adaptado de LIMA, 2017) ..	21
Figura 3-1: <i>Microwave Paddle Dryer</i> para (a) vista superior externa e (b) vista da estrutura interna do secador (Adaptado de SANTOS, 2018) .....	23
Figura 3-2: Representação da geometria da pá.....	24
Figura 3-3: Vista superior do trecho utilizado para os experimentos (a) vazio e (b) preenchido com sementes de soja .....	24
Figura 3-4: Distribuição granulométrica para grãos de soja pelo CAMSIZER .....	25
Figura 3-5: Disposição espacial inicial do material granular ( <i>side-by-side</i> ) .....	27
Figura 3-6: Etapas para o cálculo do Índice de Segregação no tempo inicial .....	28
Figura 3-7: Etapas para o cálculo do Índice de Segregação para experimento numérico .....	29
Figura 3-8: Etapas do pós-processamento de dados para quantificação das respostas .....	31
Figura 3-9: Divisão em 5 seções para análise da velocidade média.....	33
Figura 4-1: Calibração a partir da cinética de segregação.....	36
Figura 4-2: Comparação das curvas da simulação com os valores otimizados e os dados experimentais.....	37
Figura 4-3: Velocidade média das partículas no leito em 50 segundos de simulação .....	38
Figura 4-4: Vista Lateral do leito (Simulação 15) no tempo de 3 segundos .....	38
Figura 4-5: Superfície de resposta para velocidade média em função da Altura do Leito e Frequência de Rotação.....	41
Figura 4-6: Superfície de resposta para velocidade média em função do Diâmetro e Frequência de rotação.....	42

Figura 4-7: Superfície de resposta para velocidade média em função do Diâmetro e Altura de leito .....	42
Figura 4-8: Mapa de velocidade para o ensaio numérico 12 ( $x_1 = 0$ , $x_2 = 1,42$ e $x_3 = 0$ ) sendo (a) Vista superior (b) Vista lateral e (c) Vista frontal para $t = 40$ s .....	43
Figura 4-9: Mapa de velocidade média para o ensaio numérico 6 ( $x_1 = 1$ , $x_2 = -1$ e $x_3 = +1$ ) sendo (a) Vista superior (b) Vista lateral e (c) Vista frontal para $t = 40$ s .....	44
Figura 4-10: Regiões analisadas nos ensaios numéricos (a) equipamento vazio e (b) equipamento preenchido .....	45
Figura 4-11: Velocidade média encontrada por região para o PCC .....	46
Figura 4-12: Vista superior do mapa de velocidade média para (a) Região 1 (b) Região 2 (c) Região 3 (d) Região 4 (e) Região 5 .....	47
Figura 4-13: Vista inferior do mapa de velocidade média para (a) Região 1 (b) Região 2 (c) Região 3 (d) Região 4 (e) Região 5 .....	48
Figura 4-14: Vista frontal do mapa de velocidade média para (a) Região 1 (b) Região 2 (c) Região 3 (d) Região 4 (e) Região 5 .....	49

---

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 2.1: Equações fundamentais da formulação DEM (Adaptado de BRANDÃO, 2019).	14
Tabela 3.1: Parâmetros encontrados na literatura.....	27
Tabela 3.2: Matriz de PCC para calibração do modelo (BRANDÃO, 2017) .....	30
Tabela 3.3: Matriz de PCC com 3 variáveis e 4 réplicas no ponto central.....	32
Tabela 3.4: Correspondência entre fatores e suas formas codificadas .....	32
Tabela 4.1: Parâmetros cinéticos de mistura .....	35
Tabela 4.2: Comparativo dos parâmetros cinéticos experimental e otimizado .....	37
Tabela 4.3: Resultado da velocidade média das partículas no PCC .....	39
Tabela 4.4: Velocidade média em 5 regiões do equipamento .....	45

---

**LISTA DE SIMBOLOS**


---

$a$	aceleração	$M^0L^1T^{-2}$
$d_{ij}$	distância entre os centros de massa das partículas i e j	$M^0L^1T^0$
$E^*$	módulo de <i>young</i> equivalente	$M^1L^{-1}T^{-2}$
$E_i$	módulo de <i>young</i> da partícula i	$M^1L^{-1}T^{-2}$
$E_j$	módulo de <i>young</i> da partícula j	$M^1L^{-1}T^{-2}$
$E_p$	módulo de <i>young</i> da partícula	$M^1L^{-1}T^{-2}$
$e_p$	coeficiente de restituição	$M^0L^0T^0$
$e_n$	coeficiente normal restituição	$M^0L^0T^0$
$e_t$	coeficiente tangencial restituição	$M^0L^0T^0$
$e_{pp}$	coeficiente de restituição partícula-partícula	$M^0L^0T^0$
$e_{pw}$	coeficiente de restituição partícula-parede	$M^0L^0T^0$
$f$	grau de preenchimento	$M^0L^0T^0$
$F$	força	$M^1L^1T^{-2}$
$F_{t,max}^d$	força tangencial máxima de amortecimento	$M^1L^1T^{-2}$
$F_f$	força de atrito	$M^1L^1T^{-2}$
$F_P$	força peso	$M^1L^1T^{-2}$
$F_{ij}$	força entre a partícula i e j	$M^1L^1T^{-2}$
$F_n$	força normal	$M^1L^1T^{-2}$
$F_n^d$	força normal de amortecimento	$M^1L^1T^{-2}$
$F_{ij}^N$	força normal	$M^1L^1T^{-2}$
$F_{ij}^T$	força tangencial	$M^1L^1T^{-2}$
$g$	gravidade	$M^0L^1T^{-2}$
$G^*$	módulo de cisalhamento equivalente	$M^1L^{-1}T^{-2}$
$G_i$	módulo de cisalhamento da partícula i	$M^1L^{-1}T^{-2}$
$G_j$	módulo de cisalhamento da partícula j	$M^1L^{-1}T^{-2}$
$h$	altura	$M^0L^1T^0$
$h_1$	altura de soltura	$M^0L^1T^0$
$h_2$	altura de ricochete	$M^0L^1T^0$
$I_i$	momento de inercia da partícula i	$M^1L^2T^0$
$k_n$	rigidez normal do modelo linear	$M^1L^0T^{-2}$

$k_t$	rigidez tangencial do modelo linear	$M^1L^0T^{-2}$
$I_i$	momento de inercia da partícula i	$M^1L^2T^0$
$L$	espessura da chapa	$M^0L^1T^0$
$M$	índice de mistura	$M^0L^0T^0$
$m$	massa	$M^1L^0T^0$
$m^*$	massa equivalente	$M^1L^0T^0$
$m_i$	massa da partícula i	$M^1L^0T^0$
$m_j$	massa da partícula j	$M^1L^0T^0$
$P$	pressão	$M^1L^{-1}T^{-2}$
$P_s$	pressão de sólidos	$M^1L^{-1}T^{-2}$
$r$	raio da partícula	$M^0L^1T^0$
$R^*$	raio equivalente	$M^0L^1T^0$
$r_i$	raio da partícula i	$M^0L^1T^0$
$r_j$	raio da partícula j	$M^0L^1T^0$
$S_n$	rigidez normal do modelo não linear	$M^1L^0T^{-2}$
$S_t$	rigidez tangencial do modelo não linear	$M^1L^0T^{-2}$
$t$	tempo	$M^0L^0T^1$
$T_R$	tempo crítico de integração	$M^0L^0T^1$
$v$	velocidade da partícula	$M^0L^1T^{-1}$
$V$	velocidade característica	$M^0L^1T^{-1}$
$V_0$	velocidade inicial	$M^0L^1T^{-1}$
$V_1$	velocidade final	$M^0L^1T^{-1}$
$v_i$	velocidade da partícula i	$M^0L^1T^{-1}$
$v_{rel}^N$	velocidade relativa normal	$M^0L^1T^{-1}$
$v_{rel}^T$	velocidade relativa tangencial	$M^0L^1T^{-1}$
$v_i$	velocidade linear da partícula i	$M^0L^1T^{-1}$
$V_i$	velocidade de impacto	$M^0L^1T^{-1}$
$v_R$	velocidade de onda de Rayleigh	$M^0L^1T^{-1}$
$V_r$	velocidade de ricochete	$M^0L^1T^{-1}$
$v_x$	velocidade linear direção x	$M^0L^1T^{-1}$
$v_y$	velocidade linear direção y	$M^0L^1T^{-1}$
$v_z$	velocidade linear direção z	$M^0L^1T^{-1}$
$x_j$	posição da partícula j	$M^0L^1T^0$

## Símbolos Gregos

$\alpha$	ângulo de inclinação do plano	$M^0L^0T^0$
$\alpha_f$	fração volumétrica da fase fluida	$M^0L^0T^0$
$\alpha_i$	ângulo de impacto	$M^0L^0T^0$
$\alpha_r$	ângulo de rechaço	$M^0L^0T^0$
$\alpha_s$	fração volumétrica da fase sólida	$M^0L^0T^0$
$\beta$	coeficiente de amortecimento	$M^1L^0T^{-1}$
$\gamma$	razão entre diâmetro da partícula com espessura da chapa	$M^0L^0T^0$
$\gamma_n$	coeficiente normal de amortecimento	$M^0L^0T^0$
$\gamma_t$	coeficiente tangencial de amortecimento	$M^0L^0T^0$
$\delta_n$	deformação viscoelástica normal	$M^0L^1T^0$
$\delta_t$	deformação viscoelástica tangencial	$M^0L^1T^0$
$\dot{\delta}_n$	velocidade de deformação viscoelástica normal	$M^1L^0T^{-1}$
$\dot{\delta}_t$	velocidade de deformação viscoelástica tangencial	$M^1L^0T^{-1}$
$\lambda_n$	coeficiente de amortecimento normal	$M^1L^0T^{-1}$
$\lambda_t$	coeficiente de amortecimento tangencial	$M^1L^0T^{-1}$
$\mu$	coeficiente de atrito	$M^0L^0T^0$
$\mu_k$	coeficiente de atrito cinético	$M^0L^0T^0$
$\mu_R$	coeficiente de atrito de rolamento	$M^0L^0T^0$
$\mu_{RPP}$	coeficiente de atrito de rolamento partícula-partícula	$M^0L^0T^0$
$\mu_{RPW}$	coeficiente de atrito de rolamento partícula-parede	$M^0L^0T^0$
$\mu_s$	coeficiente de atrito estático	$M^0L^0T^0$
$\mu_{SPP}$	coeficiente de atrito estático partícula-partícula	$M^0L^0T^0$
$\mu_{SPW}$	coeficiente de atrito estático partícula-parede	$M^0L^0T^0$
$\rho_p$	densidade da partícula	$M^1L^{-3}T^0$
$\rho_s$	densidade da fase sólida	$M^1L^{-3}T^0$
$\sigma$	desvio padrão da composição da mistura	$M^0L^0T^0$
$\sigma_0$	desvio padrão inicial da composição da mistura	$M^0L^0T^0$
$\sigma_0^2$	variância inicial da composição da mistura	$M^0L^0T^0$
$\sigma^2$	variância da composição da mistura	$M^0L^0T^0$
$\sigma_p$	razão de <i>poisson</i>	$M^0L^0T^0$
$\sigma_r$	desvio padrão final da composição da mistura	$M^0L^0T^0$

$\sigma_r^2$	variância final da composição da mistura	$M^0L^0T^0$
$\tau_{ij}$	torque entre a partícula i e j	$M^1L^2T^{-2}$
$\omega$	velocidade angular de rotação do tambor	$M^0L^0T^{-1}$
$\omega_c$	velocidade angular crítica de rotação do tambor	$M^0L^0T^{-1}$
$\omega_i$	velocidade angular da partícula i	$M^0L^0T^{-1}$

---

## RESUMO

---

A secagem industrial por micro-ondas vem sendo desenvolvida e se mostra uma alternativa inovadora para a descontaminação de cascalhos de perfuração. Os resultados apresentados na literatura revelam que esta tecnologia tem potencial para reduzir os teores de fase orgânica a níveis abaixo de 1% em massa. Foi desenvolvido uma unidade experimental, denominada *Microwave Paddle Dryer* (MPD), que permitirá avaliar de forma mais efetiva modos de aumentar a eficiência do processo e reduzir dimensões do equipamento, assim como avaliar a eficiência da introdução de pás mecanizadas para promover agitação do material. O entendimento do comportamento dinâmico é de fundamental importância no desenvolvimento de aplicações. As simulações numéricas despontam como uma ferramenta importante na compreensão dos fenômenos que ocorrem em sistemas de mistura. Assim, este trabalho teve como objetivo aplicar a metodologia Lagrangeana na caracterização do escoamento granular do secador *Microwave Paddle Dryer* e estudar o efeito das variáveis operacionais velocidade de rotação das pás, altura do leito e diâmetro das partículas na dinâmica de transporte e mistura do material granular no interior do secador. O material utilizado foi grãos de soja, devido à sua alta esfericidade, à grande disponibilidade e aos parâmetros DEM já levantados pela literatura. Realizou-se a calibração dos coeficientes de atrito de rolamento e estático partícula-partícula e partícula-parede para a soja. Estes parâmetros foram avaliados em um PCC e comparados com os valores obtidos experimentalmente. Através de análise de imagem, os índices de segregação numéricos e experimentais foram determinados. Após o processo de calibração, foram realizadas diversas simulações a partir de outro PCC proposto avaliando o efeito das variáveis operacionais na velocidade média em todo o leito e em 5 regiões definidas. Apesar da calibração ter sido realizada para a soja, foi investigado o efeito do diâmetro nas simulações devido a outros tipos de materiais que serão utilizados futuramente no secador. Os resultados evidenciaram que a velocidade de rotação das pás e o diâmetro da partícula apresentaram as maiores influências na resposta. A velocidade média das partículas apresentou pouca influência à altura do leito, apresentando similaridades com trabalhos anteriores em equipamentos tipo *paddle*. Foi identificado que a região de alimentação apresentou zona de estagnação por não possuir pás para realizar a agitação e pelo efeito de parede terminal. A metodologia Lagrangeana mostrou-se uma ferramenta promissora para a análise de escoamento do secador.

Palavras-chave: Equipamento *Paddle*, abordagem Lagrangeana, velocidade média, PCC.

---

## ABSTRACT

---

Over the last few years, industrial microwave drying has been developed and is an innovative alternative for decontamination of drill cuttings. The results presented in the literature reveal that this technology has the potential to reduce organic phase contents to levels below 1% by mass. An experimental unit, called *Microwave Paddle Dryer* (MPD) was developed, which will allow for more effective evaluation of ways to increase process efficiency and reduce equipment dimensions, as well as evaluate the efficiency of introducing mechanized paddles to promote material agitation. As drying tests are in the initial phase, understanding the dynamic behavior is of fundamental importance in equipment modeling and application development. In this context, numerical simulations emerge as an important tool in understanding the phenomena that occur in mixing systems. Thus, this work aimed to apply the Lagrangian methodology in the characterization of the granular flow of the *Microwave Paddle Dryer* and to study the effect of operational variables: blade rotation velocity, bed height and particle diameter on the dynamics of transport and mixing flow. of the granular material inside the dryer. The chosen material used in this work was soybeans, due to its high sphericity, wide availability and DEM parameters already raised by a vast literature. Calibration of the rolling and static particle-particle and particle-wall friction coefficients was performed. These parameters were evaluated in a CCD (Central Composite Design) and compared with the values obtained experimentally. Through image analysis, the numerical and experimental segregation indices were determined. After the calibration process, several simulations were carried out from another proposed CCD, evaluating the effect of operational variables on the average velocity throughout the bed and in 5 defined regions. Although the calibration was carried out for soybeans, the effect of diameter in the simulations was investigated due to other types of materials that will be used in the future in the dryer. The results showed that the speed of rotation of the blades and the particle diameter had the greatest influences on the response. The average velocity of the particles had little influence on the bed height, showing similarities with previous works in paddle equipment. It was identified that the feeding region presented a stagnation zone because it does not have paddles to carry out the agitation and because of the end wall effect. The Lagrangian methodology proved to be a promising tool for the analysis of dryer flow.

Keywords: Paddle equipment, Lagrangian approach, average velocity, CCD.

---

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

---

Um dos processos de maior relevância para a economia nacional – e mundial – é a exploração de petróleo. Por possuir diversas etapas no processo industrial, há de se estudar formas para redução de custos, riscos ambientais e operacionais. Em relação ao processo de perfuração do poço de petróleo, utiliza-se o método de perfuração rotativo, que consiste em pressionar a broca sobre a rocha e realizar o movimento de rotação, ocasionando o tritramento da mesma (PETRI, 2014). Já a remoção dos fragmentos rochosos é feita mediante fluidos de perfuração.

Componentes essenciais do processo de perfuração, os fluidos possuem várias funções, sendo a mais importante o transporte de cascalho, que são produzidos à medida que a broca perfura a rocha para a superfície. Como o fluido é bombeado no interior da coluna de perfuração, ao passar pela broca ele arrasta os sólidos, trazendo-os até a superfície pelo espaço anular do poço (THOMAS, 2004).

Objetivando satisfazer normas ambientais e a diminuição de custo na etapa de perfuração, tanto o fluido quanto o cascalho passam por um sistema de controle de sólidos quando chegam à superfície. Esse sistema é composto por diversos equipamentos que promovem a separação do fluido e do cascalho, onde o primeiro é recuperado para ser reutilizado, enquanto o segundo ainda encerra certa quantidade de fluido aderido em si e é descartado.

Órgãos ambientais estabelecem que o teor orgânico de fluido sintético de base não aquosa aderido aos cascalhos descartados em plataformas *offshore* não pode ultrapassar de 6,9%, em massa, e pretendem reduzir este limite até a regra do descarte zero até o ano de 2022 (IBAMA, 2018). Essas novas regras impostas pelos órgãos ambientais são de essencial importância para a preservação do ambiente marinho e exigem adaptação rápida por parte das empresas do setor petrolífero (MOTA, 2018).

Como os equipamentos atualmente utilizados no controle de sólidos alcançam teores percentuais próximos ao limite ambiental, novas técnicas de limpeza do cascalho contaminados com o fluido de perfuração estão sendo estudadas, visando maior descontaminação e que sejam, ao mesmo tempo, práticas e economicamente viáveis. Entre elas, a técnica da secagem via micro-ondas.

Ao longo dos últimos anos, a secagem industrial por micro-ondas vem sendo desenvolvida e se mostra uma alternativa para a descontaminação de cascalhos de perfuração. Esses estudos tiveram início com SHANG *et al.* (2005, 2006, 2007), ROBINSON *et al.* (2009, 2010, 2012) e passaram a ser estudados mais recentemente por PEREIRA *et al.* (2014), SANTOS *et al.* (2014), PETRI *et al.* (2015), ROSSI *et al.* (2017), SANTOS (2018) e MOTA (2018). Os resultados apresentados na literatura revelam que esta tecnologia tem potencial para reduzir os teores de fase orgânica a níveis abaixo de 1%, em massa. Esses trabalhos foram realizados em diversos fornos micro-ondas, em que a maior parte deles não apresentavam agitação mecânica com pás mecanizadas e havia a dificuldade de homogeneização do material no processo de secagem.

Um dos objetivos almejados pelo estudo de SANTOS (2018) foi a obtenção de um equipamento compacto o suficiente para operar em uma plataforma de perfuração, reduzindo os custos e os riscos do transporte dos cascalhos da plataforma a uma estação de tratamento em terra. Os resultados obtidos pelo grupo de pesquisa liderado pelo Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde da Universidade Federal de Uberlândia serviram como base para o projeto de uma nova unidade, denominada *Microwave Paddle Dryer* (MPD) – já construído e em fase de testes – que permitirá avaliar de forma mais efetiva modos de aumentar a eficiência do processo e reduzir dimensões do equipamento, assim como avaliar a eficiência da introdução de pás mecanizadas para promover agitação do material.

Inspirado nos secadores comerciais de pás denominados *Paddle Dryers*, o novo protótipo possui dois eixos com pás contrarrotativos em formato de cunha, que são responsáveis por promover uma íntima mistura do material de modo a tornar mais homogênea a absorção da radiação, além de aumentar a transferência de calor entre os sólidos. Nesse sentido, o entendimento do comportamento dinâmico no interior do secador *Paddle Dryer* é de fundamental importância na modelagem do equipamento e no desenvolvimento de aplicações.

As simulações numéricas despontam, então, como uma ferramenta importante na compreensão dos fenômenos que ocorrem em sistemas de mistura. A modelagem matemática da dinâmica do material no interior do equipamento pode ser abordada de duas formas: Euleriana e Lagrangeana. Na primeira, as fases são tratadas como interpenetrantes e contínuas. Na segunda, cada partícula é acompanhada individualmente, como resultado da aplicação de um balanço de forças na posição real da partícula. Essa última, usada em simulações DEM

(*Discret Element Method*), tem sido empregada na literatura em estudos envolvendo simulação de dinâmica de partículas em equipamentos *Paddle*. (EBRAHIMI, YARAGHI, *et al.*, 2021)

### **1.1 Objetivo Geral**

Desta maneira, este trabalho busca avaliar experimentalmente a dinâmica de escoamento no equipamento *Microwave Paddle Dryer* (MPD) e a modelagem, através da metodologia Lagrangeana, do movimento das partículas no equipamento, promovendo uma comparação entre os resultados encontrados utilizando as simulações DEM e os experimentos.

### **1.2 Objetivos Específicos**

A proposta intitulada como “Estudo da dinâmica de escoamento do equipamento *Microwave Paddle Dryer*” tem como principais objetivos específicos:

Aplicar a metodologia Lagrangeana na caracterização do escoamento granular do secador *Microwave Paddle Dryer*.

Estudar o efeito das variáveis operacionais: velocidade de rotação das pás, da altura do leito e diâmetro das partículas na dinâmica de transporte e mistura do material granular no interior do secador a partir das simulações Lagrangeana.

---

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Neste capítulo, é apresentado uma revisão da literatura referente à descrição das principais características de equipamentos do tipo *Paddle*, bem como uma breve apresentação do *Microwave Paddle Dryer*. São apresentados e discutidos alguns dos trabalhos relacionados ao tema proposto e as principais características da abordagem numérica Lagrangeana, assim como os parâmetros DEM.

#### 2.1 Equipamentos *Paddle Dryer*

Para processos que exijam misturas de materiais particulados — como no setor alimentício e farmacêutico, por exemplo — os Equipamentos *Paddle* despontam como excelentes alternativas, haja vista a grande quantidade e variedade de formato de pás dentro do equipamento para realização de aplicações específicas. Além disso, há a possibilidade operá-lo em batelada como também em modo contínuo, variando a taxa de alimentação, velocidade de rotação das pás e tempo de operação (HASSANPOUR, TAN, *et al.*, 2011).

Vários secadores comerciais foram desenvolvidos baseado nesse tipo de equipamento, sendo denominados *Paddle Dryer* (Figura 2-1). As vantagens desses em relação aos secadores comerciais comuns são: minimização do tamanho do secador devido a melhor relação área de transferência de calor por volume; as pás em forma de cunha aumentam a área de transferência de calor e o coeficiente de transferência de calor é relativamente alto entre os sólidos devido à boa mistura; a distribuição do tempo de residência é controlada e o pó é uniformemente seco; polpas com alto teores de umidade ou materiais com alta viscosidade podem ser tratados nesse tipo de equipamento; podem ser operados, a depender do projeto, na condição de vácuo para materiais sensíveis a altas temperaturas (NARA MACHINERY, 2021)

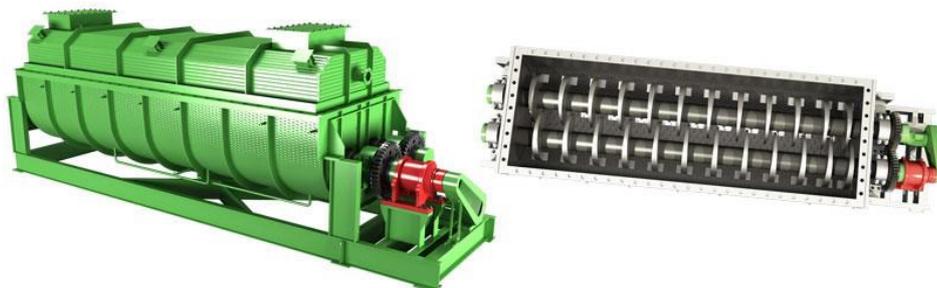


Figura 2-1: Secador comercial tipo *Paddle Dryer*. (Adaptado de SANTOS, 2018)

Em secadores *Paddle Dryer*, os dois eixos de pás contrarrotativos em uma calha aquecida garantem uma transferência de calor muito alta e uma mistura ideal. O meio de transferência de calor (vapor superaquecido, óleo térmico ou vapores de combustão) flui através dos eixos ocultos das pás. Isso resulta em um bom controle de temperatura do material que se deseja tratar, permitindo uniformidade no processo. Os eixos são precisamente alinhados e as pás se entrelaçam conforme giram, criando o contato ideal entre a superfície e o produto. A calha tem uma forma de  $\omega$  (*ômega*) que segue o contorno das pás. Em alguns equipamentos, as pás em formato de cunha são autolimpantes e permitem o tratamento de produtos altamente viscosos.

Existem diversas maneiras de secar produtos, mas duas etapas são essenciais: o fornecimento de calor suficiente para evaporar o líquido e um meio de remover o vapor gerado. Um secador direto usa fluxo de ar quente para ambas as funções e, comumente, uma parte do calor é desperdiçado e muita poeira é criada, ocasionando mau cheiro quando aplicado em secagens de lodo industrial, por exemplo. Um secador indireto, como é o caso de secadores *Paddle Dryer*, evita todos esses problemas, visto que há troca térmica pelo contato dos eixos e das pás quentes com o material que se deseja secar, promovendo uma boa mistura e o aumento da área de transferência de calor. Além disso, esses secadores operam totalmente fechados, permitindo o tratamento seguro de produtos tóxicos, nocivos ou inflamáveis (ANDRITZ, 2021).

Secadores tipo *Paddle Dryer* apresentam uma grande variedade de aplicações devido a essas características, entre elas no tratamento de lodo industrial, lodo municipal, lodos da indústria têxtil, lamas de perfuração, e nas secagens de biomassa. São utilizados em linhas de produção de polímeros, como PET (politereftalato de etileno) e SAP (polímeros superabsorventes), no tratamento de minerais e na indústria alimentícia. Muitas indústrias têm utilizado esse tipo de secador devido à sua robustez para tratamento de materiais abrasivos e por ser um equipamento compacto, por possuir muitos metros quadrados de superfície de troca térmica em relação ao volume (GEMDRYERS, 2021).

A aplicação mais encontrada na literatura para esse tipo de secador é no tratamento de lodo industrial e lodo de esgoto, devido à robustez no processo de mistura da lama bem como a inibição de odores no processo. Estudos foram realizados analisando as emissões de compostos voláteis no processo, e concluiu-se que a temperatura e o teor de água do lodo

tiveram grandes efeitos nas taxas de emissão de amônia, n-heptano, ácidos graxos voláteis e metano (YAN, LI, *et al.*, 2009; SHENGYONG, YANG, *et al.*, 2013).

DENG *et al.* (2013) investigaram a influência dos diferentes fluidos transportadores de calor nos eixos ocas das pás no processo de secagem (vapor superaquecido, óleo térmico e vapores de combustão) e evidenciaram que a resistência convectiva foi dominante em relação a condutiva. CHARLOU *et al.* (2015) investigaram o tempo de residência do lodo industrial nesse tipo em um secador *paddle* a partir da detecção de traçadores minerais por fluorescência de Raio-X, mostrando que essa técnica analítica ofereceu uma resposta linear à concentração do traçador no lodo seco. LYU *et al.* (2021) realizaram uma modelagem bidimensional do fluxo de lodo de esgoto baseado na teoria da cadeia de Markov e, a partir dos ensaios experimentais, o modelo demonstrou a capacidade de descrever o fluxo de lodo e o tempo de residência.

MILHÉ *et al.* (2016) investigaram as influências da temperatura de parede e do tempo de residência, que se mostraram significativas, no teor de umidade final em um secador *Paddle Dryer*, e concluíram que o teor inicial de água pouco interferiu no processo de secagem. Para além da aplicação no tratamento de lodo industrial, VIOLA *et al.* (2016) avaliaram um secador *Paddle* em escala piloto para produção de etanol de 2ª Geração a partir da lignocelulose da palha de trigo pré-tratada e evidenciou vantagens do uso desse equipamento em substituição ao agitador e extrator, em algumas condições, devido a boa mistura do mosto na etapa da hidrólise.

Baseado nesse tipo de equipamento, o grupo de pesquisa liderado pelo Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde, da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, desenvolveu o *Microwave Paddle Dryer* (MPD), mostrado na Figura 2-2, fruto de resultados apresentados em trabalhos de secagem por micro-ondas. O MPD foi projetado visando ser um equipamento compacto o suficiente para operar em uma plataforma de perfuração, reduzindo os custos e os riscos do transporte de cascalho da plataforma a uma estação de tratamento em terra. Outro requisito almejado foi o desenvolvimento de uma tecnologia capaz de alcançar o teor orgânico residual dos cascalhos a níveis inferiores a 1% com gasto energético de até 0,2 kWh/kg (SANTOS, 2018). Os protótipos testados, incluindo uma unidade semi-industrial (PETRI, 2017), mostraram-se economicamente competitivos e com alto grau de segurança durante a operação.

A diferença fundamental desse equipamento para os equipamentos comerciais e dos encontrados na literatura está no processo de secagem, visto que esse protótipo não possui eixos ocas das pás por onde passam os fluidos transportadores de calor, mas realiza a secagem por

meio das micro-ondas geradas pelos 9 *kits de Magnétrons* instalados na parte superior. Esse equipamento tem como principal objetivo realizar a secagem de cascalho contaminados com fluidos de perfuração e atingir níveis inferiores a 1% em massa de teores residuais de contaminantes.



Figura 2-2: Representação do *Microwave Paddle Dryer* (MPD) (SANTOS, 2018)

Para identificar as condições ótimas de operação desse novo equipamento, faz-se necessário o entendimento da dinâmica do material particulado para diversas condições operacionais, visto que a otimização e o controle de mistura são extremamente importantes, mas ainda muito desafiadores. A dificuldade consiste em obter dados de velocidade e segregação interna durante os processos de mistura e analisar o comportamento cinemático dos materiais usando abordagens experimentais, particularmente em grandes escalas (PASHA M., 2015). No Item 2.2 será apresentado as aplicações da abordagem Lagrangeana nesse tipo de equipamento.

## 2.2 Aplicações da abordagem Lagrangeana em Equipamentos *Paddle*

Com a intuito de obter melhor compreensão dos efeitos das condições de operação (velocidade de rotação, taxa de alimentação, nível de preenchimento), geometria (diâmetro das pás, angulação das pás, distâncias entre as pás, comprimento do equipamento) e propriedades granulares (tamanho de partícula, forma, densidade), sobre o comportamento das partículas em equipamentos *paddle*, estudos numéricos e experimentais são necessários. Estes estudos devem ter como foco principal no processo de mistura, cuja eficiência está diretamente ligada ao objetivo almejado, seja alcançando uma especificação do produto desejado em aplicações farmacêuticas ou alimentícias ou obtendo quantidades mínimas de teores de umidade ao final de uma secagem.

As simulações computacionais têm se mostrado eficazes em revelar dados fundamentais sobre os mecanismos e a cinética de mistura de partículas que seriam complexas, demoradas, caras e, em alguns casos, impossíveis de atingir por meio de técnicas experimentais (GOLSHAN S., 2017). O Método de Elemento Discreto (DEM) é uma das técnicas numéricas mais comumente usada para simular o fluxo de material granular em diferentes sistemas (HASSANPOUR, TAN, *et al.*, 2011). Na técnica DEM as forças de contato partícula-partícula e partícula-parede são calculadas a fim de obter a velocidade e a posição de cada partícula individual dentro do processo.

HASSANPOUR *et al.* (2011) compararam a velocidade média das partículas prevista pela simulação numérica DEM de um equipamento *paddle* — com dois eixos contrarrotativos, cada um com 10 pás posicionadas em pares ao longo de 5 posições axiais — com medições experimentais da velocidade média das partículas baseadas no método de Rastreamento de Partículas de Emissão de Pósitrons (*PEPT*), que é adequada para escalas menores. Foi investigado a influência do tamanho da partícula para determinado nível de enchimento, velocidade de rotação dos eixos e densidade das partículas. Em 10 segundos de simulação, foi observado que quanto maior a velocidade de rotação dos eixos, maiores são os valores encontrados na velocidade média das partículas. O aumento do diâmetro da partícula e do grau de preenchimento impactaram sensivelmente a resposta.

PASHA *et al.* (2015) investigaram, no mesmo equipamento, o efeito do número de partículas traçadoras na distribuição de velocidade média no tempo sobre toda a população de partículas. Os resultados da simulação indicaram que a velocidade média das partículas traçadoras flutuou em torno do valor médio obtido para todas as partículas, sugerindo que a velocidade média do traçador é representativa da velocidade média das partículas do sistema. Os dados do experimento PEPT com traçador apresentaram boa concordância com os valores obtidos por meio das simulações DEM. Os resultados sugeriram, também, que o aumento do número de traçadores no equipamento não influenciou na distribuição de velocidade média.

LI *et al.* (2013) estudaram o efeito da distribuição do tamanho da partícula na segregação e uniformidade do leito em um equipamento *paddle* industrial. Com uma boa concordância dos resultados da simulação com os resultados experimentais de trabalhos anteriores, esses autores constataram que devido à geometria específica do misturador, partículas grandes tendem a segregar na região da parede do leito, enquanto partículas menores apresentam uma boa mistura no centro e na região superior.

EBRAHIMI *et al.* (2018) avaliaram a influência da configuração das pás no desempenho da mistura de partículas esféricas monodispersas em um equipamento de pás. Cinco configurações diferentes de impulsor foram usadas nas simulações DEM. Verificou-se que a configuração do impulsor teve um impacto importante no desempenho da mistura e no comportamento granular. Os resultados de desvio padrão relativo (RSD) obtidos a partir dos modelos DEM validados revelaram que, em geral, os equipamentos que empregam configurações de pás angulares de 30° e 45° proporcionaram melhores desempenhos de mistura quando comparados aos misturadores que empregam o 0°, 60° e 90°.

YARAGHI *et al.* (2018) analisaram a cinética de mistura e os padrões de fluxo de partículas não coesivas, monodispersas e esféricas em um misturador *paddle* por meio de experimentos, análise estatística e método dos elementos discretos (DEM). O *software* comercial EDEM 2.7 foi usado como o resolvidor numérico DEM. Os resultados do experimento e da simulação apresentaram uma boa concordância. O modelo DEM foi então utilizado para examinar os efeitos da velocidade de rotação do impulsor, nível de enchimento do recipiente e arranjo de carregamento de partículas na qualidade geral da mistura quantificada pelo desvio padrão relativo do índice de mistura (RSD). Os resultados da simulação revelaram que o aumento da velocidade de rotação das pás implicou em um melhor grau de mistura para todos os arranjos de carregamento de partículas e níveis de enchimento do equipamento. O aumento do nível de enchimento do vaso melhorou a velocidade média e o desempenho da mistura para as maiores velocidades de rotação das pás, mas foi indiferente para a menor velocidade de rotação analisada. Além disso, concluiu-se que o arranjo de carregamento de partículas não teve um efeito considerável no índice de mistura. A análise de variância (ANOVA) mostrou que a velocidade de rotação das pás teve a maior influência na qualidade da mistura, seguida pelo efeito quadrático da velocidade de rotação das pás e, por último, o nível de enchimento do vaso. Ao avaliar o coeficiente de difusividade e o número de *Peclet*, concluiu-se que o mecanismo de mistura dominante no sistema de mistura atual é a difusão.

EBRAHIMI *et al.* (2021) investigou a mistura de partículas bidispersas em um equipamento *Paddle* por meio da técnica experimental de amostragem direta e pelo *software* LIGGGHTS como solucionador DEM. Uma estreita concordância entre os resultados de simulação e os dados experimentais foi observada. Utilizando-se do modelo DEM calibrado, foi analisada a influência da velocidade de rotação das pás, nível de enchimento do vaso, razão do número de partículas ( $rn$ ) e arranjo de carga de partículas na qualidade de mistura, obtendo

como resposta o desvio padrão do índice de mistura (RSD) e Índice de Segregação. Verificou-se que a razão do número de partículas ( $m$ ) teve o efeito mais significativo no desempenho da mistura. Verificou-se também que o mecanismo de difusão foi dominante sobre o mecanismo de convecção e nos casos em que os valores dos coeficientes de difusão das partículas de 5 mm e 3 mm foram próximos, o melhor desempenho de mistura foi alcançado. Além disso, velocidades mais altas de rotação das pás resultaram em uma melhor mistura.

YUAN *et al.* (2021) estudou o efeito das configurações da pá na mistura de partículas, de um material fertilizante, em um equipamento *paddle* de bancada em modo contínuo. O método dos elementos discretos (DEM) e medidas experimentais foram usados para caracterizar o efeito das pás na mistura das partículas. Os resultados de desvio padrão relativo (RSD) obtidos a partir dos modelos DEM validados revelaram que os ensaios com maiores velocidades de rotação da pá e maiores ângulos laterais conferiram maior desempenho de mistura. O aumento no número de pás aumentou o desempenho e a velocidade das partículas. As contribuições dos mecanismos convectivos e difusivos no movimento das partículas foram estudadas, e a convecção foi considerada o mecanismo dominante.

Os estudos envolvendo a dinâmica de partículas em equipamento *Paddle Dryer* são ainda escassos e incipientes. Na Figura 2-3 é apresentada a quantidade de trabalhos publicados sobre o tema, na base do *science direct*, nos últimos 40 anos. A maior parte dos trabalhos são apenas citações desse tipo de secador, não envolvendo um estudo aprofundado na geometria e no escoamento. Devido a isso, há a motivação de levantar informações sobre as condições de operação bem como o entendimento da dinâmica de transporte do secador.

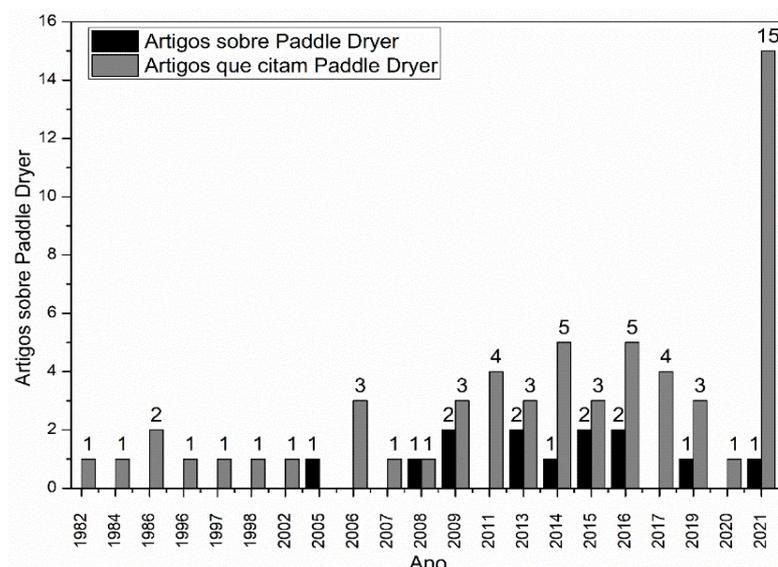


Figura 2-3: Quantidade de artigos publicados no *science direct* sobre *Paddle Dryer*

### 2.3 Abordagem Numérica

O conhecimento da dinâmica das partículas dentro de secadores e misturadores é necessário para um melhor desempenho desses equipamentos. Paralelo aos ensaios experimentais, que são desenvolvidos para a descrição da fluidodinâmica do material particulado dentro dos equipamentos, o uso de ferramentas numéricas tem ajudado na compreensão dos escoamentos graças à crescente capacidade de processamento dos computadores. Outra vantagem das simulações computacionais consiste na quebra de empecilhos que são impostos experimentalmente, permitindo alcançar condições que experimentalmente não são realizadas por questões de segurança ou financeiras (NASCIMENTO, 2018).

### 2.4 Abordagem Lagrangeana – Método dos Elementos Discretos (DEM)

Uma das ferramentas mais utilizadas na descrição de fluxos granulares atualmente é o Método dos Elementos Discretos (DEM), que foi proposto, originalmente, por CUNDALL & STRACK (1979) no estudo de solos e fragmentos rochosos. Nele, todas as trajetórias das partículas são acompanhadas e é aplicada uma integração temporal do balanço de forças sobre cada partícula individualmente, considerando as interações partícula-partícula e partícula-parede (BRANDÃO, 2017).

Duas etapas principais são consideradas na modelagem DEM: a primeira é a lei de deslocamento (*displacement law*), que computa as forças de contato que ocorrem entre partículas e entre partículas-parede; a segunda é a Lei de Newton, que é aplicada em cada partícula de forma a avaliar de qual maneira as forças de contato e de campo definem seu movimento.

Portanto, a aceleração da partícula pode ser determinada pelo quociente da força resultante pela sua massa. Com base nesse valor, o algoritmo atualiza os valores de velocidade após sucessivas integrações temporais por meio de cada *time-step* e, conseqüentemente, a trajetória, a rotação e o deslocamento são recalculados (PENG, 2014).

Na Figura 2-4 é mostrado, de forma estruturada, o ciclo de cálculo do DEM.

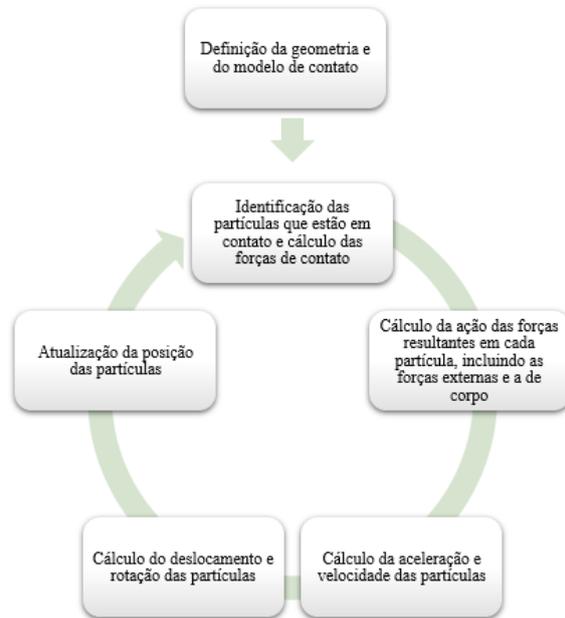


Figura 2-4: Algoritmo empregado nas simulações DEM (adaptado de LIMA, 2017)

Para uma partícula  $i$  com massa  $m_i$  e momento de inércia  $I_i$  dois tipos de força são, normalmente, levados em consideração: a força peso  $m_i g$ , resultado do campo gravitacional, e a força de contato. Quando uma partícula  $i$  colide com uma partícula  $j$  (ou parede  $j$ ), a força de contato é decomposta em duas componentes: força normal  $F_n^{ij}$  e tangencial  $F_t^{ij}$ . Então, a segunda Lei de Newton pode ser escrita conforme Equação (2.1), sendo  $v_i$  a velocidade linear.

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j (F_n^{ij} + F_t^{ij}) + m_i g \quad (2.1)$$

Conforme CUNDALL & STRACK (1979), a velocidade  $v_i$  e a posição  $x_i$  são calculados através do desenvolvimento dessa equação, evidenciado nas Equações (2.2) e (2.3).

$$v_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} = v_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} + \frac{1}{m_i} \left( m_i g + \sum_j (F_n^{ij} + F_t^{ij}) \right) \Delta t \quad (2.2)$$

$$x_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} = x_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} + v_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} \Delta t \quad (2.3)$$

Por sua vez, a velocidade angular e a posição angular da partícula são calculadas pelas Equações (2.4), (2.5) e (2.6), considerando  $\omega_i$  a velocidade angular,  $R_i$  o raio da partícula  $i$ ,  $\theta_i$  a posição angular e  $\tau_{rij}$  o torque.

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j (R_i \times F_t^{ij}) + \tau_{rij} \quad (2.4)$$

$$\omega_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} = \omega_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} + \left( \frac{\sum \tau_{rij}}{I_i} \right) \Delta t \quad (2.5)$$

$$\theta_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} = \theta_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} + \omega_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} \Delta t \quad (2.6)$$

#### 2.4.1 Modelo de Contato

Conforme visto no algoritmo empregado pelas simulações DEM, após a definição da geometria deve-se escolher adequadamente o modelo de contato. Os modelos de contato descrevem como as partículas se comportam quando em contato umas com as outras. Há dois principais tipos de modelos utilizados em simulações DEM: modelo de esfera rígida, proposto por ALDER & WAINWRIGHT (1957), e o modelo de esfera macia, proposto por CUNDALL & STRACK (1979).

No primeiro modelo, as colisões são consideradas como binárias e instantâneas, tornando-se inviáveis, por essa razão, para sistemas com alta concentração granular e contatos longos. A partir do coeficiente de restituição, parâmetro que mensura a dissipação de energia cinética, as velocidades pós-colisão são calculadas, e o tempo até a próxima colisão é utilizado para atualizar a posição e as velocidades de todas as partículas presentes no conjunto. (BUIST *et al*, 2016; SANTOS, 2020)

Já os modelos de esferas macias, também denominado modelo não-linear de Hertz-Mindlin, são apropriados para sistema com alta concentração granular e longos períodos entre as partículas (BRANDÃO, 2019). Ao custo de um tempo computacional mais elevado, ele permite a análise de interações entre partículas e entre partícula-parede, em uma abordagem onde o modelo de contato é introduzido para quantificar essas interações com base na deformação (*overlap*) das partículas em contato (SANTOS, 2020).

São apresentadas, na Tabela 2.1, as equações fundamentais da formulação não-linear de Hertz-Mindlin, onde  $\delta_n$  é a sobreposição normal,  $\delta_t$  é a sobreposição tangencial,  $v_n^{rel}$  é a velocidade normal relativa,  $v_t^{rel}$  é a velocidade tangencial,  $E_i$  é o Módulo de *Young* da partícula i,  $E_j$  é o Módulo de *Young* da partícula j,  $G_i$  é o Módulo de cisalhamento da partícula i,  $G_j$  é o Módulo de cisalhamento da partícula j e  $e_p$  é o coeficiente de restituição. A máxima força tangencial ( $F_{t,max}^d$ ) é restringida pela lei de atrito de Coulomb que, conforme Equação (2.7), é função do coeficiente de atrito estático ( $\mu_s$ ) e da força normal ( $F_n$ ).

$$F_{t,max}^d = \mu_s F_n \quad (2.7)$$

Tabela 2.1: Equações fundamentais da formulação DEM (Adaptado de BRANDÃO, 2019)

Força Normal	$F_n = \frac{4}{3} E^* \delta_n^{\frac{3}{2}} \sqrt{R^*}$	(2.8)
Módulo de <i>Young</i> Equivalente	$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_j^2}{E_j}$	(2.9)
Raio equivalente de contato	$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j}$	(2.10)
Força normal de amortecimento	$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} v_n^{rel}$	(2.11)
Coeficiente de amortecimento	$\beta = \frac{\ln e_p}{\sqrt{\ln^2 e_p + \pi^2}}$	(2.12)
Rigidez normal	$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_n}$	(2.13)
Massa equivalente	$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j}$	(2.14)
Força tangencial	$F_t = -\delta_t S_t$	(2.15)
Força tangencial de amortecimento	$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^*} v_t^{rel}$	(2.16)
Rigidez tangencial	$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n}$	(2.17)
Módulo de cisalhamento equivalente	$\frac{1}{G^*} = \frac{2 - \nu_i}{G_i} + \frac{2 - \nu_j}{G_j}$	(2.18)

### 2.4.2 Tempo de Integração

Nas simulações DEM, a escolha de um passo no tempo (*time-step*) adequado é de fundamental importância para garantir que não sucedam sobreposições excessivas de partículas, e para garantir que a propagação das ondas de perturbação apenas de sua vizinha local sejam o motivo dos movimentos de cada uma delas (THORNTON, 2015).

Em um conjunto de partículas, a propagação de força entre elas ocorre através da onda de Rayleigh, que é definida como sendo a onda mecânica que percorra a superfície de corpos elásticos. Assim sendo, o tempo de integração que deve ser empregado em uma simulação DEM deve ser inferior ao necessário para que a onda de Rayleigh percorra a partícula de menor tamanho (DANBY, SHRIMPTON e PALMER, 2013), conforme é ilustrado na Figura 2-5.

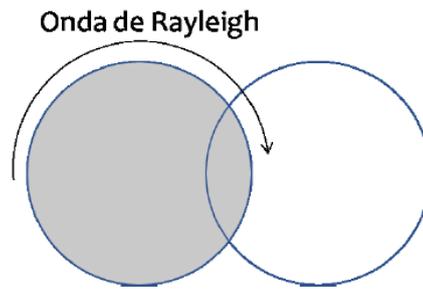


Figura 2-5: Propagação da onda de Rayleigh (BRANDÃO, 2017)

As Equações (2.19) e (2.20) apresentam a velocidade de onda de Rayleigh e o intervalo de tempo crítico de integração (LI, LIU, *et al.*, 2016), onde  $r$  é o raio da menor partícula do sistema,  $\rho_s$  é a densidade da partícula,  $\nu_i$  é a razão de *Poisson* e  $G_i$  é o módulo de cisalhamento.

$$v_R = (0,1613\nu_p + 0,8766) \sqrt{\frac{G}{\rho_s}} \quad (2.19)$$

$$T_R = \frac{\pi r^2 \sqrt{\frac{\rho_s}{G_i}}}{(0,1613 \cdot \nu_i + 0,8766)} \quad (2.20)$$

É recomendado a utilização de 5 a 20% do passo de tempo crítico estipulado pela Equação (2.20) para que se garanta a estabilidade numérica das simulações. (DANBY, SHRIMPTON e PALMER, 2013)

## 2.5 Parâmetros DEM

Como evidenciado nas equações descritas anteriormente, o modelo de simulação DEM necessita de parâmetros de entrada e de propriedades das partículas, tais como densidade, módulo de cisalhamento (quociente entre a tensão de cisalhamento aplicada ao corpo e sua deformação específica) e razão de *Poisson* (quociente entre a deformação transversal associada a uma deformação longitudinal na direção do esforço de tração). A determinação desses parâmetros pode ser feita experimentalmente ou obtidos através da literatura para diversos tipos de materiais; também necessita de interações partícula-partícula e partícula-parede, tais como coeficientes de restituição, coeficientes de atrito estático, dinâmico e de rolamento (LIMA, 2017), que serão brevemente descritos nesta seção.

### 2.5.1 Coeficiente de Restituição

O coeficiente de restituição ( $e_p$ ) é a razão entre as velocidades relativas posterior ( $v_1$ ) e anterior ( $v_0$ ) à colisão entre dois corpos. É um parâmetro que está relacionado à conservação da energia mecânica após o choque entre partículas ou partículas e superfície, como é expresso na Equação (2.21).

$$e_p = \frac{v_1}{v_0} \quad (2.21)$$

A partir dessa equação e da lei da conservação da energia, pode-se também escrever o coeficiente de restituição como mostrado na Equação (2.22), levando em consideração corpos de provas submetidos às condições experimentais em queda livre, desprezando a resistência do ar, em que  $h_0$  e  $h_1$  são a altura inicial e altura atingida após o choque, respectivamente.

$$e_p = \sqrt{\frac{h_1}{h_0}} \quad (2.22)$$

O valor do coeficiente de restituição varia entre 0 e 1 a depender do tipo, do formato e da velocidade relativa das partículas ou partícula e superfície no momento do impacto. Ocorre

uma colisão perfeitamente inelástica ( $e_p=0$ ) quando uma partícula é solta de uma altura  $h_0$  em uma superfície e há a dissipação de toda a sua energia durante o choque; de outro modo, denomina-se colisão perfeitamente elástica ( $e_p=1$ ) quando a partícula, após o choque, retorna para a mesma posição que se encontrava antes, indicando que não houve perda de energia. A Figura 2-6 exemplifica esses dois sistemas.

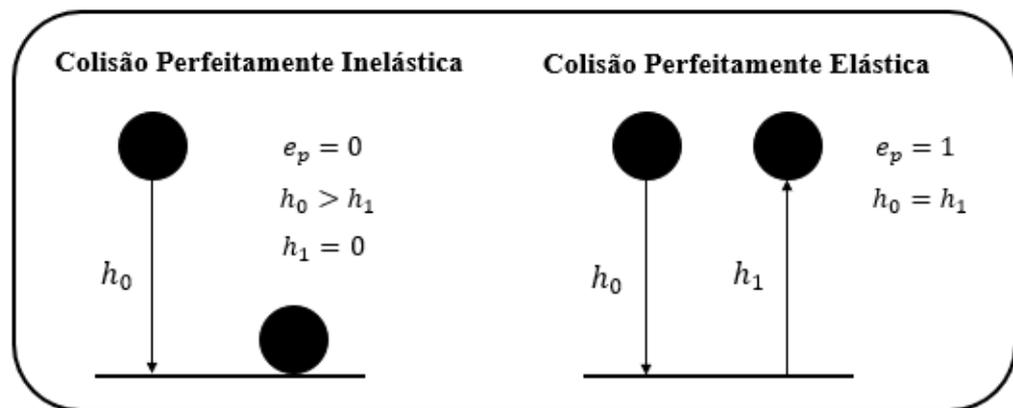


Figura 2-6: Colisão Perfeitamente Inelástica e Colisão Perfeitamente Elástica (Adaptado de BRANDÃO, 2019)

O diâmetro da partícula, espessura da superfície de impacto e a velocidade de impacto são alguns dos exemplos de propriedades que podem influenciar nos valores do coeficiente de restituição. São diversas as metodologias apresentadas na literatura para a determinação desse parâmetro, entre elas a proposta por ZHU *et al.* (2008), sendo aplicada preferencialmente para materiais com superfícies irregulares, na qual se realiza o lançamento de partículas sobre superfícies inclinadas. Há também o método “*drop teste*”, de queda livre, preferencialmente para partículas com alta esfericidade. O parâmetro, nesse último caso, é calculado pela equação acima.

ZHU *et al.* (2008) utilizou-se da metodologia de colisão numa superfície inclinada ao examinar partículas processadas industrialmente – que apresentam, em sua grande maioria, formas irregulares. Desta forma, o vetor coeficiente de restituição e o vetor velocidade se separam na componente normal e tangencial, conforme Figura 2-7.

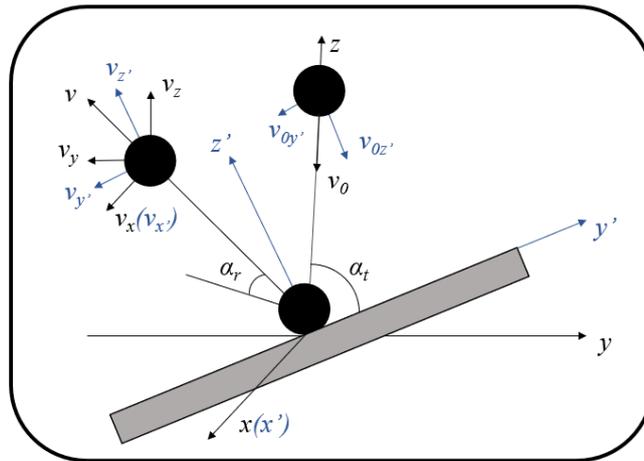


Figura 2-7: Impacto oblíquo de uma partícula (Adaptado de DIAS & BARROSO *et al.*, 2006)

A partir das Equações (2.23), (2.24) e (2.25) podem ser calculadas as velocidades da partícula antes e após o impacto.

$$v_0 = \sqrt{2gH} \quad (2.23)$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (2.24)$$

$$e_p = \frac{v}{v_0} = \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}}{\sqrt{2gH}} \quad (2.25)$$

ZENER *et al.* (1941) e MUELLER *et al.* (2015) propuseram um modelo de medição do coeficiente de restituição como função apenas do parâmetro inelástico ( $\lambda$ ). Este parâmetro depende da geometria (diâmetro da esfera e espessura da placa), das propriedades dos materiais (densidade, módulo de *Young* e razão de *Poisson*) e da velocidade de impacto. Os dois modelos apresentaram boa concordância quando comparados com os dados experimentais.

### 2.5.2 Coeficiente de Atrito Estático

O coeficiente de atrito estático de um corpo é definido como a força de resistência ao movimento relativo entre corpos ou entre corpos e superfícies. Esta força se revela ao longo da região de contato entre as duas superfícies em direção oposta ao movimento.

Algumas leis foram formuladas para o atrito, que foram oriundas das observações fenomenológicas (HUTCHINGS, 2016) Leonardo da Vinci, Guillaume Amontons e Charles Augustin Coulomb estabeleceram, historicamente, as seguintes formulações:

- Independência da área de contato, onde se declara que o atrito não é condicionado à área aparente de contato.
- Lei de Amontons, em que é considerada a proporcionalidade entre a força de atrito e carga aplicada.
- Lei de Coulomb, que afirma a independência da velocidade em relação força de atrito.

PASSOS & SILVA (2012) e HUTCHINGS *et al.* (2001) revelam que, usualmente, o valor do coeficiente de atrito estático em superfícies não lubrificadas está na faixa de 0,10 a 2,00 e que, durante as medidas, a limpeza da superfície a ser analisada, o acabamento superficial e características vibracionais das máquinas de testes são exemplos de precauções que devem ser tomadas durante as medidas.

Uma metodologia altamente aplicada para obtenção do coeficiente de atrito dá-se por meio do sistema “trenó”, apresentada por Leonardo da Vinci, representada na Figura 2-8. Nesse sistema, a força normal é calculada a partir da massa do corpo de prova é empregada na horizontal por meio de uma polia, como mostrada na imagem, controlada a partir de células de carga ou motor de acionamento. Desta forma, o coeficiente de atrito na eminência do movimento pode ser determinado pelas Equações (2.26), (2.27) e (2.28).

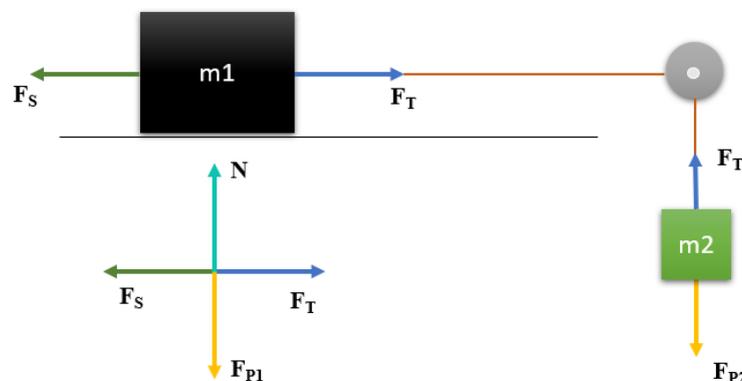


Figura 2-8: Representação do sistema tipo “trenó” (Adaptado de BRANDÃO, 2019)

$$F_S = \mu_S F_{P1} \quad (2.26)$$

$$F_S = F_T \quad (2.27)$$

$$\mu_S = \frac{F_{P2}}{F_{P1}} = \frac{m_2}{m_1} \quad (2.28)$$

RAY CHAUDHURI & HUTCHINSON *et al.* (2005) realizaram testes experimentais para medição dos coeficientes de atrito utilizando o método da medição dos coeficientes de atrito através do plano inclinado e do plano horizontal. Para o coeficiente de atrito estático, o método do plano inclinado apresentou valores inferiores quando comparado ao plano horizontal. Segundo os autores, isso ocorre porque na inclinação pode suceder uma distribuição irregular das forças no corpo, fazendo que o movimento do bloco ocorra de forma antecipada. Na análise do coeficiente de atrito cinético, os autores variaram os ângulos de inclinação e a carga aplicada e perceberam que independente das variações, os resultados foram similares, mas ao comparar os dois métodos, o plano inclinado apresentou valores próximos, porém inferiores ao do plano horizontal.

CHEN *et al.* (2015) utilizaram do plano inclinado para medir coeficiente de atrito de esferas de vidro em cima de uma chapa de vidro, enquanto LI *et al.* 2005 realizaram esse estudo para os mesmos materiais, entretanto, com a metodologia do plano horizontal. Nos dois trabalhos os autores salientaram que as esferas foram coladas para que houvesse rolamento e garantirem, dessa forma, o deslizamento no plano. Assim como no trabalho anteriormente citado, os valores para o plano horizontal foram melhores. É importante salientar a dificuldade de se realizar esse experimento, haja vista que as esferas tendem a rolar na superfície em vez de deslizarem, o que deprecia a análise do coeficiente de atrito, e preocupação que esses autores tiveram durante o experimento para evitar esse erro.

### 2.5.3 Coeficiente de Atrito de Rolamento

Conforme diz a ASTM G194-08 (2013), a resistência provocada ao movimento de rolamento de uma partícula esférica dá-se o nome de coeficiente de atrito de rolamento. A Figura 2-9 ilustra essa resistência evidenciando o diagrama de forças de uma esfera em movimento. O valor desse coeficiente, a depender do material, pode ser duas ou até três ordens de magnitude menor que os coeficientes de atrito estático e cinético (ASM Handbook, 1992;

MATUTTIS e CHEN, 2014) e pode ser expresso pela Equação (2.29) como parâmetro adimensional:

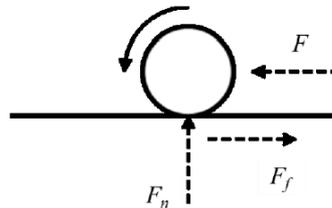


Figura 2-9: Diagrama de forças de uma esfera em movimento (Adaptado de LIMA, 2017)

$$F_f = \mu_R F_n \quad (2.29)$$

Quando se faz uma análise para rolamento de várias partículas em contato, o atrito pode ser representado em termos de torque, em que  $\tau_r$  e  $r$  são o torque e o raio da partícula, respectivamente, conforme Equação (2.30).

$$\tau_r = \mu_R r F_n \quad (2.30)$$

O coeficiente de atrito de rolamento apresenta, geralmente, valores em ordens de grandeza extremamente baixas, como para materiais de elevada dureza, onde são encontrados na literatura valores na ordem de 0,001 (ZHOU, WRIGHT, *et al.*, 1999). É amplamente aplicado em diversas situações práticas o princípio de rolamento em detrimento do deslizamento, haja vista os baixos coeficientes de atrito, como pode ser observado em roda e mancais de rolamento (WANG, ZHOU, *et al.*, 2015). Um sólido que rola sem escorregar vai ceder energia, lentamente, ao meio que se encontra em contato, de acordo com ZHOU *et al.* (1999).

São realizados diversos estudos para entender a origem do atrito de rolamento na interação entre partículas. Os mecanismos propostos até então podem ser classificados em dois grupos: o primeiro é a dissipação de energia na interface de contato de duas partículas, devido a irregularidades na superfície, adesão molecular, propriedades de superfície e ao micro deslizamento e fricção. A energia cinética de uma partícula é dissipada, neste mecanismo, resultando na desaceleração da velocidade de rolamento da partícula (ZHENG, ZHU e YU, 2011); o segundo mecanismo está relacionado ao comportamento inelástico dos materiais das

partículas. Em uma região de contato, tem-se que uma partícula é submetida a forças de compressão e expansão constantemente durante o processo de rolamento, então há dissipação de energia nessa deformação inelástica (ZHENG, ZHU e YU, 2011).

Uma das maiores dificuldades encontradas em simulações DEM está relacionada justamente à determinação desses parâmetros que o modelo necessita. Medições confiáveis desses parâmetros mencionados ainda são um desafio (BRANDÃO, 2019).

Uma das abordagens mais usadas, conforme relata CUNHA *et al.* (2016), trata-se de selecionar os parâmetros de entrada DEM calibrando o modelo em relação às medições experimentais, isto é, os resultados numéricos são comparados com as observações experimentais até que haja equivalência entre elas. Entretanto, esse método pode apresentar como resultado parâmetros com ausência de significados físicos (AI *et al.*, 2011.a; BRANDÃO, 2019). Apesar dessas dificuldades, o procedimento de calibração é mais utilizado na escolha dos parâmetros de entrada de simulação DEM (NASCIMENTO, 2018).

Vale ressaltar a dificuldade de se realizar uma simulação Euleriana nesse tipo de equipamento. Como o MPD possui dois eixos precisamente alinhados e as pás se entrelaçam conforme giram, haveria a necessidade de se utilizar uma malha móvel e adaptativa, que possivelmente exigiria um alto custo computacional. Como nesse sistema há uma grande quantidade de partículas em fase densa, o movimento delas, individualmente, é mais relevante a ser analisado em comparação com a movimentação da fase fluida. A revisão da literatura, mostrada no Item 2.2, evidencia a utilização da abordagem Lagrangeana para esses casos. Logo, há menor riqueza de informações referentes aos contornos das partículas e da vizinhança, que são informações necessárias para simulações Eulerianas. Assim, para esse caso, a simulação CFD tenderia a ser mais complexa e exigiria um alto custo computacional. Isso justifica a abordagem adotada no trabalho.

No presente capítulo foram contemplados os conceitos fundamentais para o entendimento do trabalho proposto. Foram apresentados também os trabalhos que mais contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação. Assim, no próximo capítulo, serão apresentados os Materiais e Métodos utilizados nos procedimentos experimentais e numéricos.

---

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

---

Neste capítulo são apresentadas as informações relevantes sobre o material e sua caracterização, unidade experimental utilizada, método de calibração de parâmetros e procedimentos adotados para os ensaios numéricos.

#### 3.1 Unidade Experimental: *Microwave Paddle Dryer*

O *Microwave Paddle Dryer* (MPD) é um forno micro-ondas projetado pelo grupo de pesquisa coordenado pelo Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde da Universidade Federal de Uberlândia para realizar aquecimento e secagem de cascalho de perfuração tanto em regime batelada quanto em regime contínuo. Esta unidade possui 2 metros de comprimento, 0,25 metros de largura, 0,25 metros de profundidade e capacidade operacional de 40 a 60 kg de material por teste de batelada. A Figura 3-1 ilustra o esquema da unidade experimental.



Figura 3-1: *Microwave Paddle Dryer* para (a) vista superior externa e (b) vista da estrutura interna do secador (Adaptado de SANTOS, 2018)

Em que,

- 1 – Motor WEG com 7,5 hp de potência;
- 2 – Inversor de Frequência modelo WEG CFW500;
- 3 – Conjunto com 9 Magnétrons com potência de saída 1000W cada;
- 4 – Duplo eixo com 26 pás em formato de cunha em cada;
- 5 – Representação da geometria das pás presentes no interior do equipamento.

Na Figura 3-1 (b), pode-se visualizar a estrutura interna do equipamento. Há a presença de eixos de dupla rotação com pás em formato de cunha — responsáveis por promover a mistura do material — tornando mais homogênea a absorção da radiação além de intensificar a transferência de calor entre os sólidos. O diâmetro de giro da pá é de 140 mm. A Figura 3-2 evidencia os detalhes da geometria da pá.

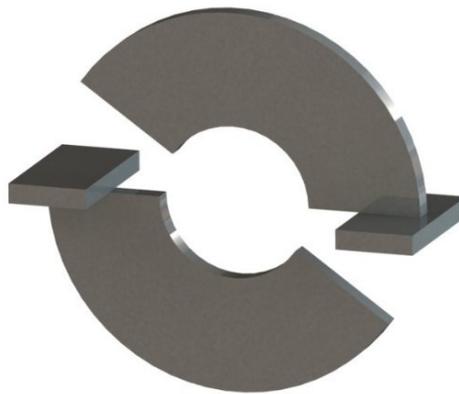
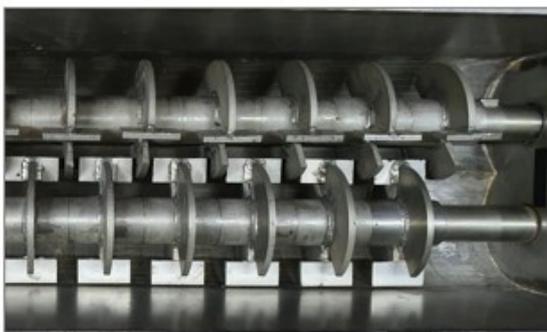


Figura 3-2: Representação da geometria da pá.

Como o foco do presente trabalho é a análise da dinâmica das partículas no interior do MPD, os ensaios experimentais foram realizados com o equipamento aberto e desconsiderando a secagem via micro-ondas. Devido à limitação da capacidade de processamento computacional, foi considerado para os testes experimentais e para as simulações 0,5 metros do equipamento. A Figura 3-3 evidencia a vista superior da seção utilizada do secador.



(a)



(b)

Figura 3-3: Vista superior do trecho utilizado para os experimentos (a) vazio e (b) preenchido com sementes de soja

### 3.2 Material e Caracterização

O material utilizado nesse trabalho para análise da dinâmica de escoamento no MPD foi grão de soja. Esse material foi escolhido devido à sua elevada esfericidade, à disponibilidade e aos parâmetros DEM já levantados por uma vasta literatura. Análise de imagens por fluxo de partículas foram empregadas para obter resultados de tamanho e esfericidade das partículas, através do equipamento da marca Retsch, modelo CAMSIZER®L.

Para realização das análises de caracterização das partículas no CAMSIZER, as partículas de soja foram alimentadas a partir de um funil e, através da dosagem do alimentador, a amostra foi transportada para a área de medição. A quantidade da amostra direcionada para a região de medição foi definida pelos ajustes automáticos da altura do funil e pela amplitude de vibração do alimentador, ambos controlados pelo *software* do equipamento. O princípio de medição do CAMSIZER baseia-se na captura das sombras de partículas dispersas que passam, em queda livre, na frente de duas fontes luminosas e pulsantes de luz LED. Uma câmera quantifica as pequenas partículas com alta resolução, e a outra câmera analisa as partículas maiores, com boa estatística, devido a um maior campo de visão. Tamanho e forma das partículas são analisados através do *software* que calcula as respectivas curvas de distribuição em tempo real. (CAMSIZER, 2010).

A distribuição de frequência é apresentada na Figura 3-4. O diâmetro médio da partícula ( $d_{50}$ ) encontrado pelo método, para os grãos de soja, foi de 6,49 mm.

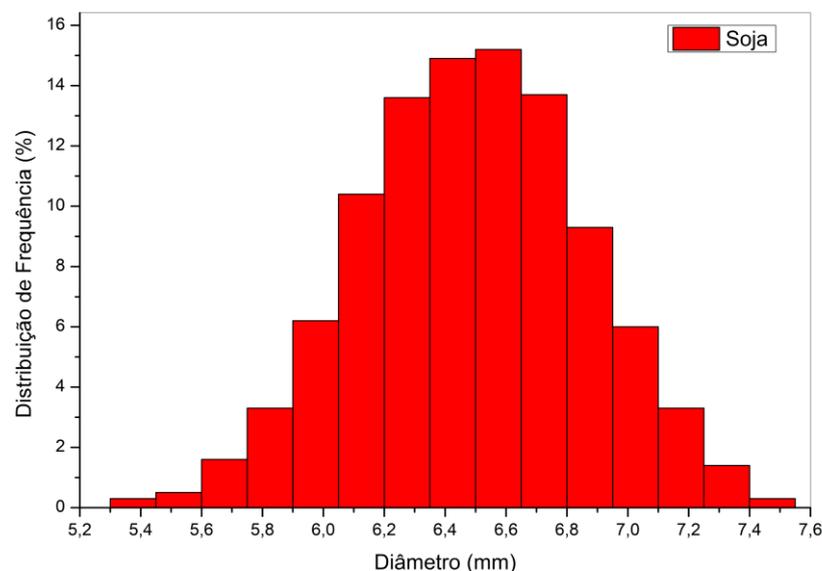


Figura 3-4: Distribuição granulométrica para grãos de soja pelo CAMSIZER

A esfericidade ( $\Phi$ ) calculada pelo CAMSIZER compreende a relação entre a área da partícula e seu perímetro, como evidenciado na Equação (3.1), e o valor medido foi de 0,988.

$$\Phi = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (3.1)$$

O valor da densidade real foi determinado utilizando um picnômetro a gás hélio da marca *Micromeritics*, modelo *Accupyc* 1331. A sensibilidade de medida do picnômetro a gás utilizado é de  $10^{-4}$  g.cm<sup>-3</sup>. Cada amostra foi colocada no equipamento onde foram realizados cinco testes e os resultados são as médias desses valores. O valor medido foi de 1,175 g.cm<sup>-3</sup>.

Todos os experimentos foram realizados na Unidade Experimental da Engenharia Química (UPEQ) e no Laboratório de Sistemas Particulados (LSP) da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

### 3.3 Abordagem Numérica Lagrangeana

Todas as simulações utilizando o DEM foram realizadas por meio do *software* livre LIGGGHTS, em que o modelo de contato utilizado foi o de Hertz-Mindlin. Para garantir a estabilidade numérica, utilizou-se um *time-step* de  $1,0 \times 10^{-5}$  s, equivalente a 12% do passo de tempo de Rayleigh, valor dentro do intervalo recomendado de 5% a 20%, conforme discutido no capítulo 2, e um tempo de simulação equivalente a 50 segundos. A geometria do equipamento foi criada no *software* livre *Gmesh* e importada para o *software* livre LIGGGHTS.

O modelo necessita de parâmetros de entrada e de propriedades das partículas, tais como densidade, módulo de cisalhamento, razão de *Poisson* e de interações partícula-partícula e partícula-parede, como coeficientes de restituição e de atrito estático e de rolamento. Algumas variáveis de entrada possuem valores já medidos e testados na literatura para as sementes de soja, como a razão de *Poisson* e módulos de cisalhamento, que foram obtidos em LIMA (2017) e BRANDÃO (2020). A Tabela 3.1 apresenta os valores dos parâmetros que foram considerados constantes e utilizados em todas as simulações numéricas. No que se refere às interações partícula-partícula e partícula-parede dos coeficientes de atrito estático e de rolamento, foram necessárias calibrações para utilização correta desses parâmetros, calculadas através do grau de mistura pelo Índice de Segregação de Lacey, que será descrito no Item 3.4.

Tabela 3.1: Parâmetros encontrados na literatura

Parâmetro	Valor	Referência
Razão de <i>Poisson</i> [-]	0,22	(LIMA, 2017)
Módulo de Cisalhamento [Pa]	$10^6$	(LIMA, 2017)
Coefficiente de Restituição [-]	0,81	(LIMA, 2017)

### 3.4 Calibração dos parâmetros

Uma das abordagens mais utilizadas, como já descrito no Item 2.2, trata-se de selecionar os parâmetros de entrada DEM calibrando o modelo em relação às medições experimentais, isto é, os resultados numéricos são comparados com as observações experimentais até que haja uma boa concordância entre elas (CUNHA, SANTOS, *et al.*, 2016).

Como forma de calibração das interações partícula-partícula e partícula-parede dos coeficientes de atrito estático e de rolamento, foi utilizado o Índice de Segregação de Lacey, que determina o grau de mistura de um sistema a partir de análise estatística.

Inicialmente, escolheu-se uma condição para realização dos testes experimentais da segregação na camada superficial do leito: a frequência de rotação dos eixos de 10 rpm e a altura do leito foi de 97 mm. Destaca-se, ainda, que metade do material foi colorido de preto para melhor visualização dos resultados. Com o auxílio de uma câmera de alta velocidade, com capacidade de captura de 240 quadros por segundo (modelo Galaxy note 10 plus full HD 1920x1080p), os testes experimentais foram gravados por 50 segundos e submetidos à análise de imagem utilizando o *software ImageJ*. A Figura 3-5 exibe a disposição espacial inicial do material granular no interior do equipamento.



Figura 3-5: Disposição espacial inicial do material granular (*side-by-side*)

As etapas para a realização das medidas do Índice de Segregação experimental e computacional são apresentadas na Figura 3-6.



Figura 3-6: Etapas para o cálculo do Índice de Segregação no tempo inicial

Etapa I: A partir dos ensaios experimentais, as imagens do leito granular foram extraídas, em intervalos de 3 segundos, para análise do índice de mistura.

Etapa II: O leito foi dividido, então, em 18 células entre as pás. Esse valor foi escolhido conforme avaliado por HARBY (1967) e LACEY (1997), em seus trabalhos, onde a quantidade ideal de amostras varia na faixa de 5 a 25, dependendo do tipo de equipamento. Essas células foram inseridas nas regiões entre as pás e próxima a parede, visto que nessa região não há interferência do aparecimento das pás ou do eixo para análise de imagem.

Etapa III: Com o auxílio do *software ImageJ*, as imagens foram convertidas para 8 *bits*, exibindo, dessa maneira, apenas pixels que condiziam às colorações branca e preta.

Posteriormente, as concentrações dos pixels pretos em todas as 18 células foram fornecidas pelo *software ImageJ* e a variância das concentrações ao longo de todo o domínio foi determinada, a partir da Equação (3.2) para intervalos de 3 segundos.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (C - C_{\text{médio}})^2}{N - 1} \quad (3.2)$$

Em que  $C$ ,  $C_{\text{médio}}$  e  $N$  são, respectivamente, concentração local de pixels pretos, a concentração média de pixels preto e o número total de células ocupadas pelas partículas. A partir dos valores encontrados para a variância, foi possível calcular, pela Equação (3.3), o Índice de Lacey ( $I_S$ ) para cada intervalo, sendo  $\sigma_0^2$  e  $\sigma_r^2$  a variância da amostra totalmente segregada e a variância da amostra totalmente misturada, respectivamente. Os valores para

Índice de Lacey variam de 0, no caso em que as partículas se encontram totalmente segregados, e 1, onde se encontram perfeitamente misturados.

$$I_S = \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2}{\sigma_0^2 - \sigma_r^2} \quad (3.3)$$

O mesmo procedimento foi realizado com as simulações numéricas nessas mesmas condições de operação, em que foi calculado a segregação na camada superficial do leito através da vista superior, variando o coeficiente de atrito estático partícula-partícula ( $\mu_{SSP}$ ), o coeficiente de atrito estático partícula-parede ( $\mu_{SPW}$ ), o coeficiente de rolamento partícula-partícula ( $\mu_{RPP}$ ) e o coeficiente de rolamento partícula-parede ( $\mu_{RPW}$ ) conforme Planejamento Composto Central (PCC) descrito na Tabela 3.2, em que as faixas dos níveis de cada parâmetro foi escolhida a partir de informações da literatura (BRANDÃO, 2017).

A Figura 3-7 apresenta as mesmas etapas que foram realizadas tanto para o ensaio experimental quanto para os ensaios computacionais.

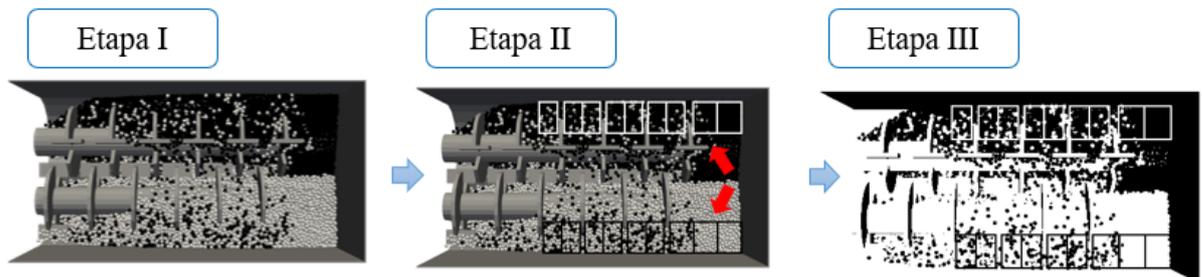


Figura 3-7: Etapas para o cálculo do Índice de Segregação para experimento numérico

Após o cálculo do Índice de Lacey tanto para os testes experimentais quanto para os testes computacionais, foi possível computar a cinética de segregação ao longo do tempo. De forma a permitir a contabilização dos efeitos da diferença dos valores do coeficiente, bem como da disposição inicial, um ajuste de dados foi realizado, utilizando da Equação (3.4), pelo *software* Statistica®7 (Algoritmo de Levenberg-Marquardt) possibilitando a estimativa da constante cinética de segregação ( $k$ ) e o valor do índice após atingir o regime estacionário.

$$I_S = M_\infty(1 - e^{-kt}) \quad (3.4)$$

Sendo  $M_\infty$  e  $k$  o Índice de Mistura no Estado Estacionário e a Constante Cinética de Mistura, respectivamente. A calibração baseou-se na verificação do conjunto de parâmetros

computacionais que promoveu a melhor reprodutibilidade do fenômeno da segregação experimental.

Tabela 3.2: Matriz de PCC para calibração do modelo (BRANDÃO, 2017)

Simulação	Parâmetros			
	$\mu_{SSP}$	$\mu_{SPW}$	$\mu_{RPP}$	$\mu_{RPW}$
1	0,50	0,20	0,03	0,02
2	0,50	0,20	0,03	0,06
3	0,50	0,20	0,08	0,02
4	0,50	0,20	0,08	0,06
5	0,50	0,50	0,03	0,02
6	0,50	0,50	0,03	0,06
7	0,50	0,50	0,08	0,02
8	0,50	0,50	0,08	0,06
9	0,80	0,20	0,03	0,02
10	0,80	0,20	0,03	0,06
11	0,80	0,20	0,08	0,02
12	0,80	0,20	0,08	0,06
13	0,80	0,50	0,03	0,02
14	0,80	0,50	0,03	0,06
15	0,80	0,50	0,08	0,02
16	0,80	0,50	0,08	0,06
17	0,43	0,35	0,06	0,04
18	0,87	0,35	0,06	0,04
19	0,65	0,13	0,06	0,04
20	0,65	0,57	0,06	0,04
21	0,65	0,35	0,02	0,04
22	0,65	0,35	0,09	0,04
23	0,65	0,35	0,06	0,01
24	0,65	0,35	0,06	0,07
25	0,65	0,35	0,06	0,04
26	0,65	0,35	0,06	0,04

### 3.5 Estudos das variáveis relevantes para o processo

A primeira resposta DEM obtida foi a velocidade média das partículas no leito (0,5 metros). A determinação dessa resposta foi realizada seguindo as etapas de pós-processamento apresentadas na Figura 3-8.

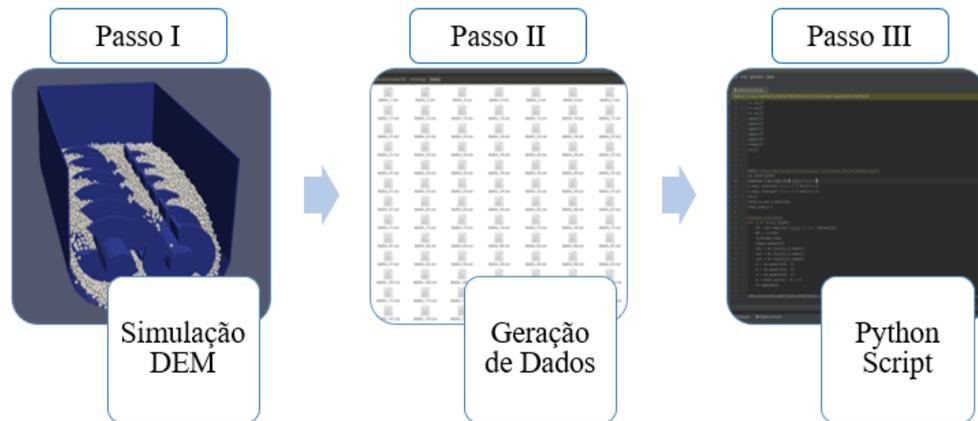


Figura 3-8: Etapas do pós-processamento de dados para quantificação das respostas

No Passo I, as simulações definidas foram realizadas utilizando o resolovedor numérico LIGGGHTS. No Passo II, os arquivos com as informações de posição e velocidade foram exportados em arquivos *.csv* para cada *time-step*. A partir dessas informações obtidas, o Passo III consistiu na criação de um código em linguagem *Python* para quantificar a velocidade média das partículas em cada *time-step* e conseqüentemente ao longo de todo o período simulado. A velocidade média foi calculada pela Equação (3.5).

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (3.5)$$

Por diminuir os esforços experimentais e permitir uma série de discussões relevantes, o Planejamento Composto Central foi proposto como ferramenta estatística. Foram definidas como variáveis independentes: diâmetro da partícula (mm), altura do leito (mm) e frequência de rotação dos eixos (rpm). Considerando as três variáveis apresentadas, o conjunto de experimentos computacionais traduz-se em 18 ensaios, dos quais 4 são réplicas do ponto central. Este valor de réplicas foi escolhido para que o planejamento fosse ortogonal, sendo o valor de alfa 1,42. A Tabela 3.3 exibe a matriz do Planejamento Composto Central em sua forma codificada.

Tabela 3.3: Matriz de PCC com 3 variáveis e 4 réplicas no ponto central

<b>Experimento</b>	<b>Diâmetro</b>	<b>Altura do leito</b>	<b>Freq. de rotação do eixo</b>
1	-1,00	-1,00	-1,00
2	-1,00	-1,00	1,00
3	-1,00	1,00	-1,00
4	-1,00	1,00	1,00
5	1,00	-1,00	-1,00
6	1,00	-1,00	1,00
7	1,00	1,00	-1,00
8	1,00	1,00	1,00
9	-1,42	0,00	0,00
10	1,42	0,00	0,00
11	0,00	-1,42	0,00
12	0,00	1,42	0,00
13	0,00	0,00	-1,42
14	0,00	0,00	1,42
15	0,00	0,00	0,00
16	0,00	0,00	0,00
17	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00

A Tabela 3.4, por sua vez, exhibe a correspondência entre cada um dos fatores codificados e seus respectivos valores na escala original.

Tabela 3.4: Correspondência entre fatores e suas formas codificadas

<b>Nível</b>	<b>Diâmetro da partícula (mm)</b>	<b>Altura do Leito (mm)</b>	<b>Frequência de rotação do eixo (rpm)</b>
-1,42	2,95	36,19	2,93
-1,00	4,00	54,00	5,00
0,00	6,49	97,00	10,00
1,00	8,98	140,00	15,00
1,42	10,02	157,81	17,07

O valor central do diâmetro da partícula foi definido como o diâmetro medido para os grãos de soja (6,49 mm), o valor da altura do leito como 70% do diâmetro de giro das pás (97,00 mm) e a frequência de rotação como a que será utilizada nos testes de secagem (10,00 rpm). Vale ressaltar que se optou por estudar a influência do diâmetro da partícula devido aos materiais que futuramente serão inseridos no secador, como o cascalho contaminado com fluido de perfuração, que possui diâmetro bem inferior ao diâmetro da soja.

Com intuito de entender melhor o comportamento das partículas em diferentes pontos do equipamento, a segunda resposta analisada foi a velocidade média em 5 regiões distintas do leito. Para isso, calculou-se a velocidade média em seções de 10 cm, enumerados de 1 a 5, conforme Figura 3-9. Para a extração dos dados e cálculo da velocidade, as mesmas etapas descritas anteriormente foram realizadas. Nota-se que na região 1 há a ausência de pás para agitação e, na região 5, há ausência de parede terminal.



Figura 3-9: Divisão em 5 seções para análise da velocidade média

O ajuste dos dados foi realizado por meio do método dos mínimos quadrados; a análise de variância da regressão foi feita com fundamento no coeficiente de correlação quadrático ( $R^2$ ); o nível de significância dos parâmetros adotado foi de 5% e as respostas foram avaliadas segundo a técnica de superfície de resposta.

---

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais e numéricos obtidos para a calibração dos parâmetros para o material granular, os resultados dos ensaios numéricos para a velocidade média do leito e para as 5 regiões do equipamento estudadas. Os Planejamentos Compostos Centrais serão apresentados assim como a discussão das principais variáveis que impactam o processo.

#### 4.1 Resultado da calibração dos parâmetros DEM

Conforme relatado no item 3.4, um PCC (Planejamento Composto Central) foi utilizado para calibração dos parâmetros DEM, sendo as variáveis estudadas: coeficiente de atrito estático partícula-partícula ( $\mu_{SSP}$ ), coeficiente de atrito estático partícula-parede ( $\mu_{SPW}$ ), coeficiente de atrito de rolamento partícula-partícula ( $\mu_{RPP}$ ), coeficiente de atrito de rolamento partícula-parede ( $\mu_{RPW}$ ). O PCC utilizou apenas uma réplica no ponto central. Para analisar o comportamento cinético da mistura, os Índices de Lacey calculados para o teste experimental e para as simulações foram associados a uma equação cinética onde os parâmetros Índice de Mistura no Estado Estacionário ( $M_{\infty}$ ) e Constante Cinética de Mistura ( $k$ ) foram estimados usando técnicas de regressão.

O valor encontrado para o Índice de Mistura no Estado Estacionário e a Constante Cinética de Mistura para os ensaios experimentais foram 0,9027 e 0,0906, respectivamente. A Tabela 4.1 apresenta o PCC com os valores desses parâmetros para os ensaios numéricos e o erro em relação ao valor encontrado experimentalmente.

A partir dos resultados da Tabela 4.1, alguns dos ensaios numéricos que evidenciaram menores desvios entre os resultados encontrados para o Índice de Mistura no Estado Estacionário ( $M_{\infty}$ ) e para a Constante Cinética de Mistura ( $k$ ) em relação aos valores experimentais, avaliados para a vista superior utilizando a técnica de análise de imagem disposto no Item 3.4, foram comparados com os dados experimentais, conforme pode ser visualizado na Figura 4-1.

Tabela 4.1: Parâmetros cinéticos de mistura

Simulação	Parâmetros				Respostas			
	$\mu_{SSP}$	$\mu_{SPW}$	$\mu_{RPP}$	$\mu_{RPW}$	$M_{\infty(\text{sim})}$	<i>Erro (%)</i>	$k_{(\text{sim})}$	<i>Erro (%)</i>
1	0,50	0,20	0,03	0,02	0,7981	11,58%	0,1096	21,03%
2	0,50	0,20	0,03	0,06	0,8297	8,08%	0,1091	20,52%
3	0,50	0,20	0,08	0,02	0,8233	8,79%	0,1097	21,09%
4	0,50	0,20	0,08	0,06	0,8461	6,27%	0,1119	23,55%
5	0,50	0,50	0,03	0,02	0,8973	0,60%	0,0659	27,23%
6	0,50	0,50	0,03	0,06	0,9249	2,46%	0,0581	35,80%
7	0,50	0,50	0,08	0,02	0,9298	3,01%	0,0614	32,23%
8	0,50	0,50	0,08	0,06	0,9434	4,52%	0,0578	36,18%
9	0,80	0,20	0,03	0,02	0,8145	9,77%	0,1123	23,95%
10	0,80	0,20	0,03	0,06	0,8202	9,14%	0,1114	23,01%
11	0,80	0,20	0,08	0,02	0,8384	7,12%	0,1116	23,26%
12	0,80	0,20	0,08	0,06	0,8529	5,52%	0,1093	20,70%
13	0,80	0,50	0,03	0,02	0,9228	2,24%	0,0597	34,02%
14	0,80	0,50	0,03	0,06	0,9471	4,92%	0,0591	34,74%
15	0,80	0,50	0,08	0,02	0,9458	4,78%	0,0595	34,35%
16	0,80	0,50	0,08	0,06	0,9567	5,99%	0,0597	34,10%
17	0,43	0,35	0,06	0,04	0,8804	2,47%	0,0811	10,48%
18	0,87	0,35	0,06	0,04	0,8984	0,47%	0,0777	14,18%
19	0,65	0,13	0,06	0,04	0,7964	11,77%	0,1219	34,57%
20	0,65	0,57	0,06	0,04	0,9121	1,05%	0,0634	30,03%
21	0,65	0,35	0,02	0,04	0,8866	1,77%	0,0776	14,35%
22	0,65	0,35	0,09	0,04	0,9024	0,03%	0,0815	10,04%
23	0,65	0,35	0,06	0,01	0,8794	2,58%	0,0865	4,43%
24	0,65	0,35	0,06	0,07	0,8887	1,54%	0,0829	8,47%
25	0,65	0,35	0,06	0,04	0,8966	0,67%	0,0789	12,82%
26	0,65	0,35	0,06	0,04	0,9567	5,99%	0,0789	12,82%

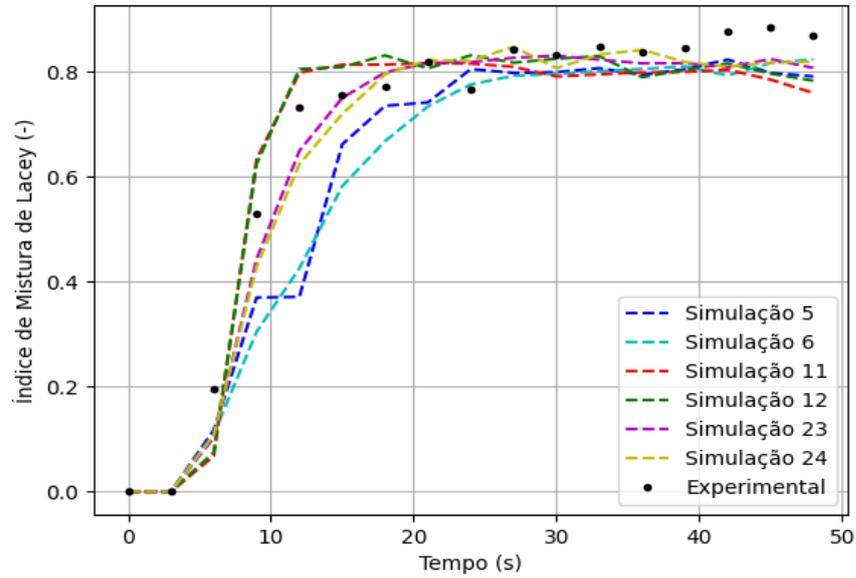


Figura 4-1: Calibração a partir da cinética de segregação

Ao observar a Figura 4-1, nota-se que as simulações escolhidas, que foram as que apresentaram os menores desvios conforme Tabela 4.1, divergiram da curva experimental nos primeiros 20 segundos e, posteriormente, convergiram entre si e se aproximaram dos dados experimentais.

As equações para predição dos dois parâmetros cinéticos, Equação (4.1) e Equação (4.2), foram ajustadas utilizando técnicas de regressão múltipla linear, apresentando coeficiente de correlação quadrático ( $R^2$ ) de 0,94 e 0,96, respectivamente, permitindo assim quantificar os efeitos das variáveis independentes sobre a resposta.

$$M_{\infty} = 0,8923 + 0,0065x_1 + 0,4997x_2 - 0,0142x_2^2 + 0,0098x_3 + 0,0081x_4 \quad (4.1)$$

$$k = 0,0804 + 0,0499x_2 - 0,0146x_2^2 \quad (4.2)$$

$$x_1 = \frac{\mu_{SPP} - 0,65}{0,15} \quad x_2 = \frac{\mu_{SPW} - 0,35}{0,15} \quad x_3 = \frac{\mu_{RPP} - 0,06}{0,02} \quad x_4 = \frac{\mu_{RPW} - 0,04}{0,02}$$

A partir das Equações (4.1) e (4.2), realizou-se uma otimização multirrespostas, realizada através da minimização da função desejabilidade, expressa pela Equação (4.5). Para isto, foi computado o erro relativo a cada uma das variáveis avaliadas, conforme Equação (4.3)

e (4.4), com o intuito de encontrar uma combinação de parâmetros que proporcionasse os menores desvios.

$$y_1 = \frac{M_{\infty(calc)} - M_{\infty(exp)}}{M_{\infty(exp)}} \tag{4.3}$$

$$y_2 = \frac{k_{calc} - k_{exp}}{k_{exp}} \tag{4.4}$$

$$Desejabilidade = y_1 \cdot y_2 \tag{4.5}$$

Os parâmetros encontrados foram  $\mu_{SPP} = 0,659$  (coeficiente de atrito estático partícula-partícula),  $\mu_{SPW} = 0,382$  (coeficiente de atrito estático partícula-parede),  $\mu_{RPP} = 0,040$  (coeficiente de atrito de rolamento partícula-partícula) e  $\mu_{RPW} = 0,055$  (coeficiente de atrito de rolamento partícula-parede), que produzem os erros encontrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Comparativo dos parâmetros cinéticos experimental e otimizado

Parâmetro	Experimental	Otimizado	Erro
$M_{\infty}$	0,9027	0,8990	0,31%
$k$	0,0906	0,0904	0,21%

Foi realizada uma simulação com os parâmetros otimizados e calculado o Índice de Segregação de Lacey para compará-lo aos dados experimentais, conforme Figura 4-2. Foi observada boa concordância e os valores encontrados foram utilizados nas demais simulações.

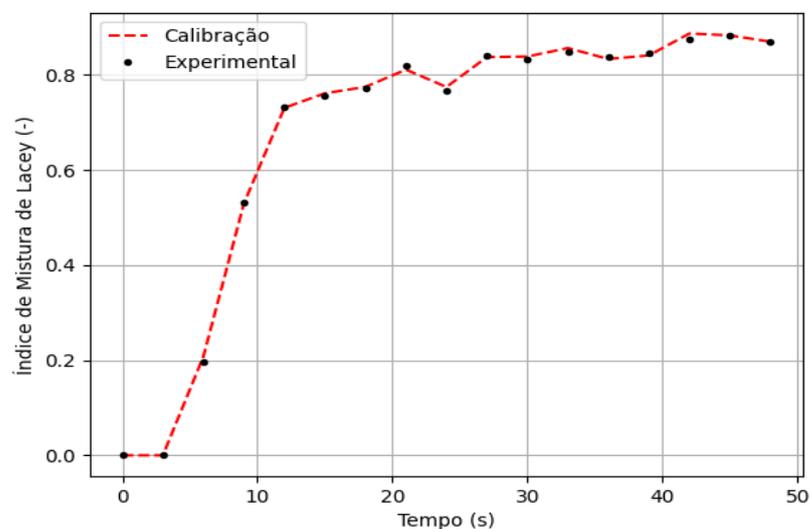


Figura 4-2: Comparação das curvas da simulação com os valores otimizados e os dados experimentais

## 4.2 Velocidade média das partículas

Conforme discutido no item 3.5, as simulações numéricas para escoamento de partícula no interior do equipamento foram realizadas no *software* livre LIGGGHTS 3.8 para diversas condições utilizando-se dos parâmetros otimizados encontrados no tópico 4.1. Os dados foram gerados a partir do *software* PARAVIEW 5.8.1 e, utilizando-se de um código *python*, a velocidade média das partículas no leito foram quantificadas. A Figura 4-3 apresenta a velocidade média das partículas em todas as simulações propostas no PCC.

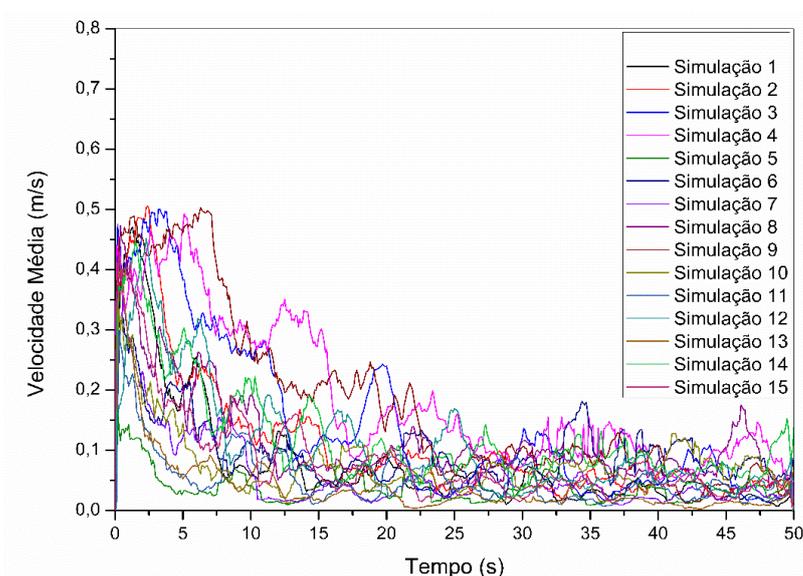


Figura 4-3: Velocidade média das partículas no leito em 50 segundos de simulação

Observa-se que, nos primeiros 20 segundos, há um elevado valor na velocidade média das partículas. Esse fenômeno pode ser explicado devido a angulação gerada pelas próprias partículas na etapa da criação, conforme Figura 4-4, vista na última parte do equipamento. Ao iniciar a rotação dos eixos, essas partículas ganham uma velocidade alta nessa região do secador. Após alguns segundos, a angulação é atenuada nessa região devido à própria movimentação das partículas das regiões anteriores e adjacentes.

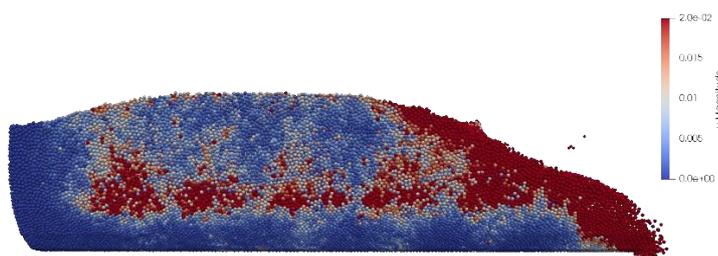


Figura 4-4: Vista Lateral do leito (Simulação 15) no tempo de 3 segundos

É possível verificar, ao analisar a velocidade média das partículas no decorrer de 50 segundos da Figura 4-3, uma estabilização no valor médio da velocidade a partir de 30 segundos de simulação, condição que o leito se encontra em regime estacionário. Devido a isso, para análise do impacto das variáveis independentes no valor da velocidade média, optou-se por calcular o valor médio a partir dos 30 segundos, ou seja, analisando os valores dos últimos 20 segundos. O valor dessa velocidade média para cada ensaio numérico encontra-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Resultado da velocidade média das partículas no PCC

Nº	X1	X2	X3	Velocidade
	Diâmetro	Altura do leito	Freq. de rotação	Média (m/s)
1	-1,00	-1,00	-1,00	0,0318
2	-1,00	-1,00	+1,00	0,0452
3	-1,00	+1,00	-1,00	0,0558
4	-1,00	+1,00	+1,00	0,1064
5	+1,00	-1,00	-1,00	0,0410
6	+1,00	-1,00	+1,00	0,0957
7	+1,00	+1,00	-1,00	0,0299
8	+1,00	+1,00	+1,00	0,0825
9	-1,42	0,00	0,00	0,0671
10	+1,42	0,00	0,00	0,0691
11	0,00	-1,42	0,00	0,0301
12	0,00	+1,42	0,00	0,0500
13	0,00	0,00	-1,42	0,0166
14	0,00	0,00	+1,42	0,0805
15	0,00	0,00	0,00	0,0434
16	0,00	0,00	0,00	0,0434
17	0,00	0,00	0,00	0,0434
18	0,00	0,00	0,00	0,0434

Inicialmente, ao analisar os pontos ortogonais, foi observado que o aumento velocidade de rotação das pás (simulações 13 e 14) apresentou a maior variação na velocidade

média das partículas, com um aumento de 384%, seguida da altura do leito (simulações 11 e 12) com 66% e, por último, o diâmetro da partícula (simulações 9 e 10), com 3%. Isso foi verificado por HASSANPOUR *et al.* (2011), em simulações de 10 segundos em equipamentos *Paddle*, em que o aumento do diâmetro da partícula apresentou pequena influência na resposta e que a velocidade de rotação das pás foi a variável mais impactante na velocidade média das partículas. EBRAHIMI *et al.* (2021) observaram também que a velocidade de rotação das pás foi a mais significativa das variáveis estudadas.

Ao se analisar as simulações de 1 a 4, em que o diâmetro das partículas permanece no nível -1 (4 mm) e há a variação da velocidade de rotação das pás e da altura do leito, nota-se que o aumento do nível de enchimento do equipamento aumentou a velocidade média para as maiores velocidades de rotação, mas pouco influenciou para a menor velocidade de rotação, fato que também foi observado por YARAGHI *et al.* (2018). O mesmo fenômeno ocorre em relação ao diâmetro da partícula no nível +1, ao observar as simulações 5 a 8, em que só há o aumento na velocidade média das partículas quando combinado com maiores velocidades de rotação das pás.

Ao analisar os ensaios 1 e 6, constatou-se que o aumento do diâmetro da partícula e da velocidade de rotação para níveis baixos de altura do leito aumentaram significativamente o valor da resposta. Isso foi observado por HASSANPOUR *et al.* (2011), em simulações de 10 segundos em equipamentos *Paddle*, em que afirmou que o aumento do diâmetro do material combinado com a velocidade de rotação das pás implicou positivamente na resposta.

A partir dos dados da Tabela 4.3, foi realizado uma regressão não linear com o intuito de quantificar a influência de cada uma das variáveis. A análise de variância da regressão foi feita com fundamento no coeficiente de correlação quadrático ( $R^2$ ), nível de significância dos parâmetros adotado foi de 5% e as respostas foram avaliadas segundo a técnica de superfície de resposta. O valor obtido para o coeficiente da correlação quadrático ( $R^2$ ) foi de 0,9038.

$$v_{med} = 0,0447 + 0,0134x_1^2 + 0,0083x_2 + 0,0226x_3 - 0,0125x_1x_2 + 0,0066x_1x_3 \quad (4.3)$$

$$x_1 = \frac{d - 6,39}{2,39} \quad x_2 = \frac{h - 97}{43} \quad x_3 = \frac{f - 10}{5}$$

A velocidade média das partículas é afetada por dois parâmetros lineares,  $x_2$  e  $x_3$ , correspondentes à altura do leito e frequência de rotação, pelo termo quadrático associado ao

diâmetro da partícula e pelos termos da combinação diâmetro/altura do leito ( $x_1x_2$ ) e altura de leito/frequência de rotação ( $x_1x_3$ ). Como o que se deseja é maximizar a velocidade média, visto que o aumento dessa variável melhora a mistura e o contato entre as partículas e, conseqüentemente, melhora a secagem na operação batelada, os coeficientes negativos estão relacionados aos parâmetros que tem influência contrária ao objetivo. No caso, o termo da interação diâmetro/altura do leito ( $x_1x_2$ ) prejudica a velocidade e a combinação diâmetro da partícula/frequência de rotação ( $x_1x_3$ ) possui o coeficiente positivo, aumentando a velocidade. A resposta é afetada principalmente pelo parâmetro linear referente à frequência de rotação, como esperado.

As superfícies de resposta do modelo reduzido estão presentes na Figura 4-5, Figura 4-6 e Figura 4-7. Em cada um dos gráficos foi plotado o comportamento da resposta em relação a duas variáveis independentes em sua forma codificada. Cada superfície foi gerada fixando o valor da terceira variável no ponto de otimização ( $x_1 = 1,42$ ,  $x_2 = -1,42$  e  $x_3 = 1,42$ ), gerado a partir de um Algoritmo de Força Bruta (CORMEN, LEISERSON, *et al.*, 2009), com base no modelo reduzido.

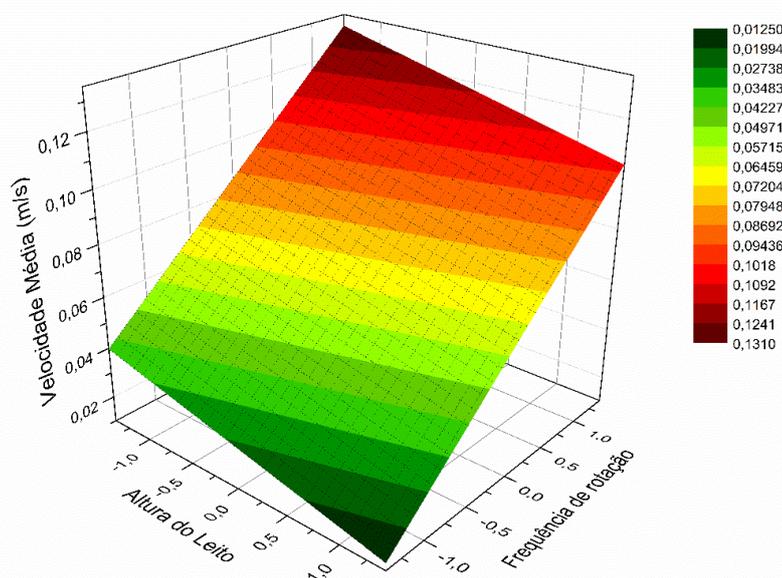


Figura 4-5: Superfície de resposta para velocidade média em função da Altura do Leito e Frequência de Rotação

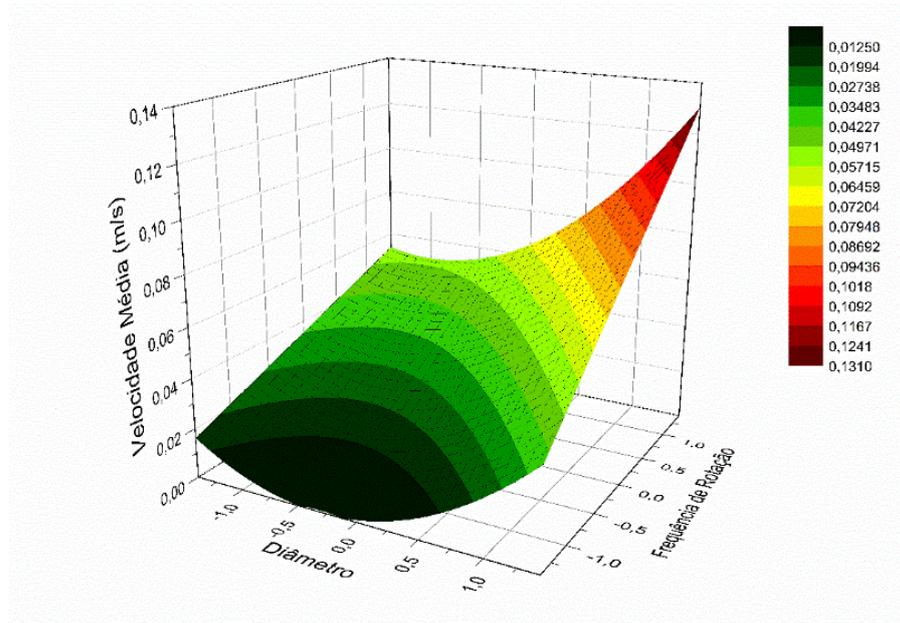


Figura 4-6: Superfície de resposta para velocidade média em função do Diâmetro e Frequência de rotação

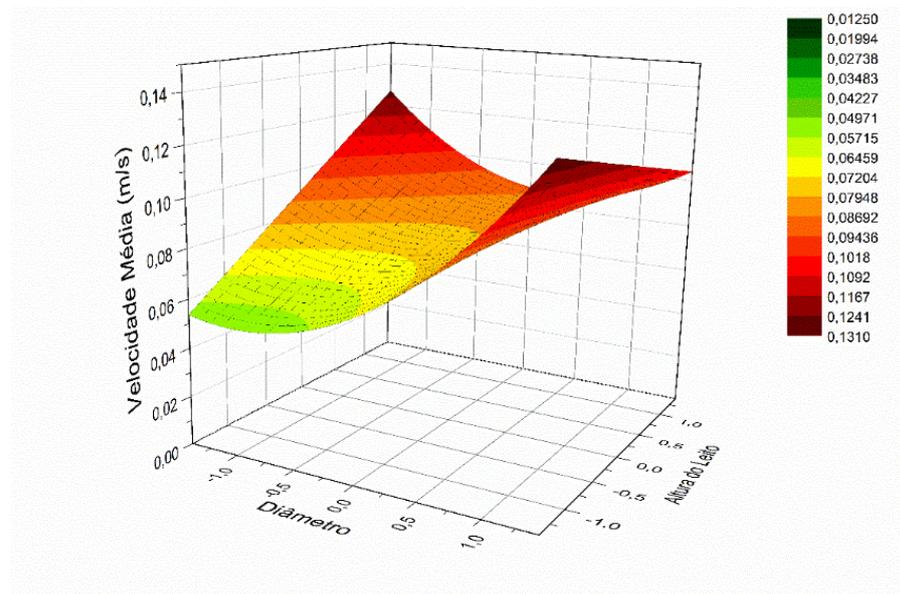


Figura 4-7: Superfície de resposta para velocidade média em função do Diâmetro e Altura de leito

Ao analisar a superfície de resposta da Figura 4-5, que fixou o diâmetro da partícula, foi possível notar que as maiores velocidades foram alcançadas com o aumento da frequência de rotação dos eixos e com a diminuição da altura do leito. Enquanto a primeira variável transferiu quantidade de movimento para o leito, fornecendo energia cinética para as partículas se movimentarem, a segunda variável prejudicou a resposta para maiores níveis. Isso pode ser

explicado devido as pás do equipamento não conseguirem movimentar as partículas que se encontravam em regiões mais altas do leito, sendo que estas só receberam momento das partículas vizinhas, conforme evidencia a Figura 4-8. Isso contribuiu para a diminuição da velocidade. Essa informação é importante, pois as pás do equipamento servem justamente para gerar uma boa mistura do leito e aumentar a eficiência de secagem. Entretanto, para alto grau de preenchimento do leito, as pás, que possuem um diâmetro de giro de 140 mm, podem não atingir as partículas das regiões superiores, obtendo zonas de baixa mistura.

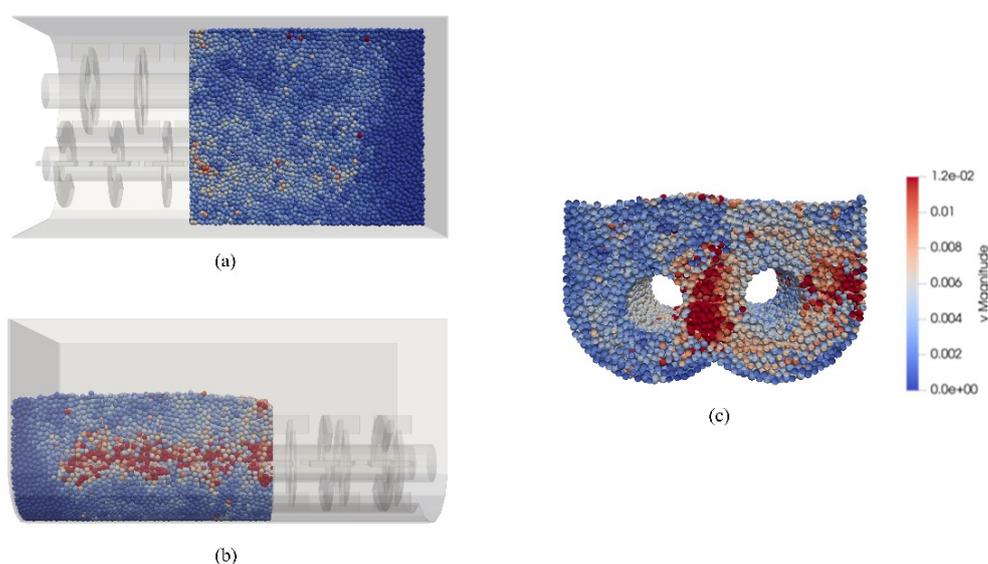


Figura 4-8: Mapa de velocidade para o ensaio numérico 12 ( $x_1 = 0$ ,  $x_2 = 1,42$  e  $x_3 = 0$ ) sendo (a) Vista superior (b) Vista lateral e (c) Vista frontal para  $t = 40$  s

Ao investigar a superfície de resposta da Figura 4-6, observou-se que os maiores valores de velocidade foram alcançados com maiores níveis de diâmetro e frequência de rotação dos eixos. Esse comportamento também foi verificado nos trabalhos de HASSANPOUR *et al.* (2011) e YARAGHI *et al.* (2018). Nesses estudos, foi concluído que a frequência de rotação dos eixos foi a variável mais relevante para que houvesse maior velocidade média das partículas e maior grau de mistura. A Figura 4-9 mostra o mapa de velocidade média para o ensaio numérico 6, onde têm-se níveis +1 para diâmetro de partícula e frequência de rotação, e nível -1 para altura de leito. Observa-se menos zonas mortas e maior velocidade média das partículas do leito em relação à observada pela Figura 4-8.

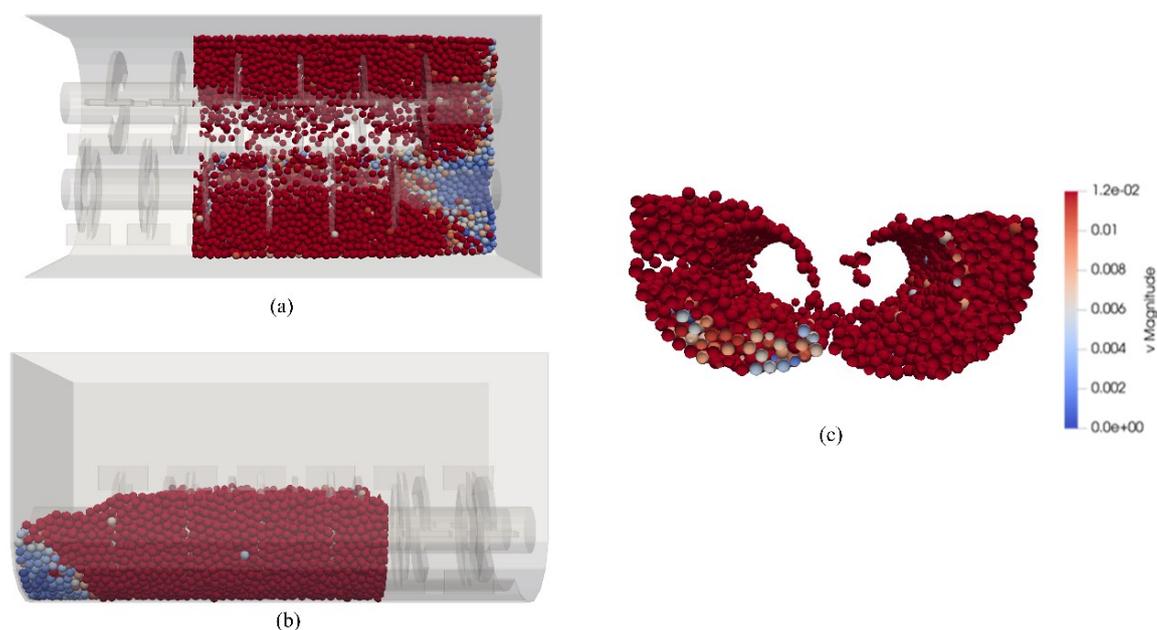


Figura 4-9: Mapa de velocidade média para o ensaio numérico 6 ( $x_1 = 1$ ,  $x_2 = -1$  e  $x_3 = +1$ ) sendo (a) Vista superior (b) Vista lateral e (c) Vista frontal para  $t = 40$  s

Ao examinar a superfície de resposta da Figura 4-7, onde fixou-se a frequência de rotação, foi possível concluir que a altura do leito e o diâmetro da partícula geraram um impacto ligeiramente sensível no valor da velocidade em comparação com a variação da velocidade média para as outras superfícies de resposta. O efeito combinado dessas variáveis carece de maior investigação.

### 4.3 Velocidade média das partículas por região

Com intuito de entender melhor o comportamento da velocidade das partículas em diferentes pontos do equipamento, o leito foi dividido em 5 regiões. Como o trecho simulado do equipamento possui 50 centímetros, calculou-se a velocidade média em trechos de 10 cm, enumerados de 1 a 5, conforme Figura 4-10. As simulações foram realizadas no *software* LIGGGHTS 3.8 e os dados foram gerados a partir do *software* PARAVIEW 5.8.1. Através de um código *python*, foi realizada a extração da velocidade média para cada uma das regiões.

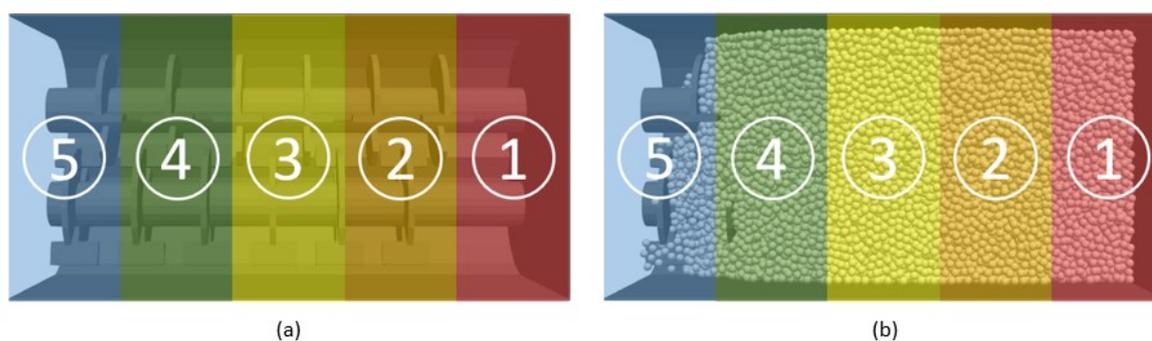


Figura 4-10: Regiões analisadas nos ensaios numéricos (a) equipamento vazio e (b) equipamento preenchido

A Tabela 4.4 mostra os valores de velocidade média encontrados em cada uma das regiões numeradas.

Tabela 4.4: Velocidade média em 5 regiões do equipamento

Nº	X1	X2	X3	Região 1	Região 2	Região 3	Região 4	Região 5
				$v_{med}$ (m/s)				
1	-1,00	-1,00	-1,00	0,00911	0,01884	0,02198	0,02887	0,03845
2	-1,00	-1,00	+1,00	0,01100	0,04111	0,04159	0,05110	0,05999
3	-1,00	+1,00	-1,00	0,00784	0,01854	0,03529	0,04146	0,05677
4	-1,00	+1,00	+1,00	0,03185	0,06233	0,06590	0,07587	0,12059
5	+1,00	-1,00	-1,00	0,01538	0,02410	0,03255	0,04879	0,06511
6	+1,00	-1,00	+1,00	0,02484	0,09185	0,09827	0,11585	0,12958
7	+1,00	+1,00	-1,00	0,00898	0,02237	0,02865	0,02757	0,03998
8	+1,00	+1,00	+1,00	0,03000	0,08449	0,08333	0,08853	0,10930
9	-1,42	0,00	0,00	0,02225	0,04222	0,05985	0,06842	0,07250
10	+1,42	0,00	0,00	0,03828	0,06515	0,07533	0,07659	0,07752
11	0,00	-1,42	0,00	0,00626	0,02560	0,03553	0,03553	0,03490
12	0,00	+1,42	0,00	0,01525	0,02991	0,03486	0,03352	0,06145
13	0,00	0,00	-1,42	0,00360	0,01550	0,01400	0,01552	0,02511
14	0,00	0,00	+1,42	0,01220	0,06779	0,06423	0,07115	0,09258
15	0,00	0,00	0,00	0,02473	0,04958	0,05301	0,05531	0,05996
16	0,00	0,00	0,00	0,02473	0,04958	0,05301	0,05531	0,05996
17	0,00	0,00	0,00	0,02473	0,04958	0,05301	0,05531	0,05996
18	0,00	0,00	0,00	0,02473	0,04958	0,05301	0,05531	0,05996

Para facilitar a visualização dos resultados foi gerado um gráfico de barras para cada condição, conforme Figura 4-11.

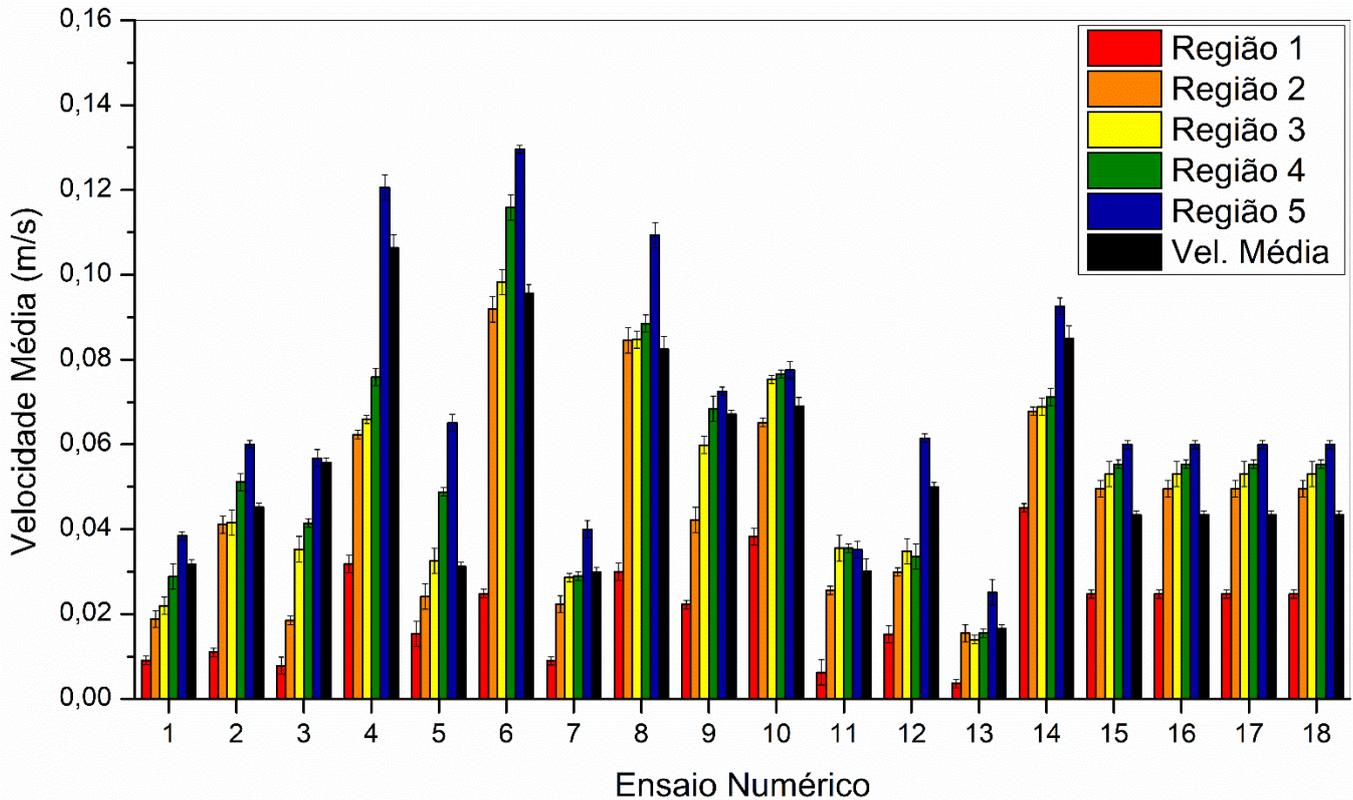


Figura 4-11: Velocidade média encontrada por região para o PCC

Inicialmente, observou-se que a Região 1 apresentou, em todos os ensaios numéricos, o menor valor de velocidade média em relação às outras regiões. Isso era esperado, visto que nessa região há a ausência de pás para realizar a movimentação das partículas, como pode ser observado na Figura 4-10 (a). Para futuros ensaios de secagem, essa região poderá apresentar zonas de estagnação e diminuir a eficiência da secagem, visto que o material que se encontra na região inferior do equipamento poderá não receber as micro-ondas. Esse efeito foi atenuado com o aumento do diâmetro da partícula e da frequência de rotação dos eixos, como pode ser observado nas simulações 10 e 14, que apresentaram os maiores valores de velocidade nessa região. Uma sugestão para que haja uma melhor mistura e agitação das partículas seria a inserção de mais uma pá, uma vez que há espaço nessa área. As Figura 4-12, Figura 4-13 e Figura 4-14 apresentam os mapas de velocidade na camada de partículas mais superficial na vista superior, vista inferior e vista frontal para o tempo de 40 segundos. A partir delas, é possível verificar as regiões de estagnação para cada bloco analisado, além do comportamento e a interação das partículas próximo ao eixo.

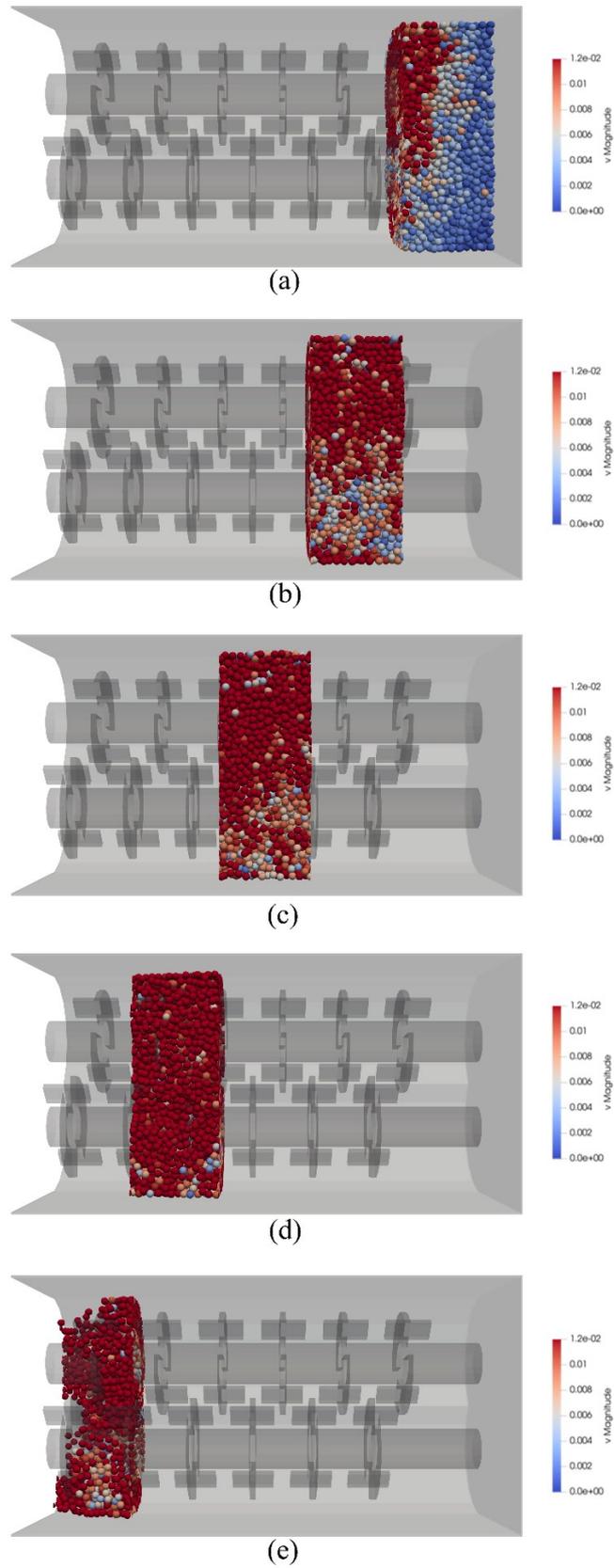


Figura 4-12: Vista superior do mapa de velocidade média para (a) Região 1 (b) Região 2 (c) Região 3 (d) Região 4 (e) Região 5

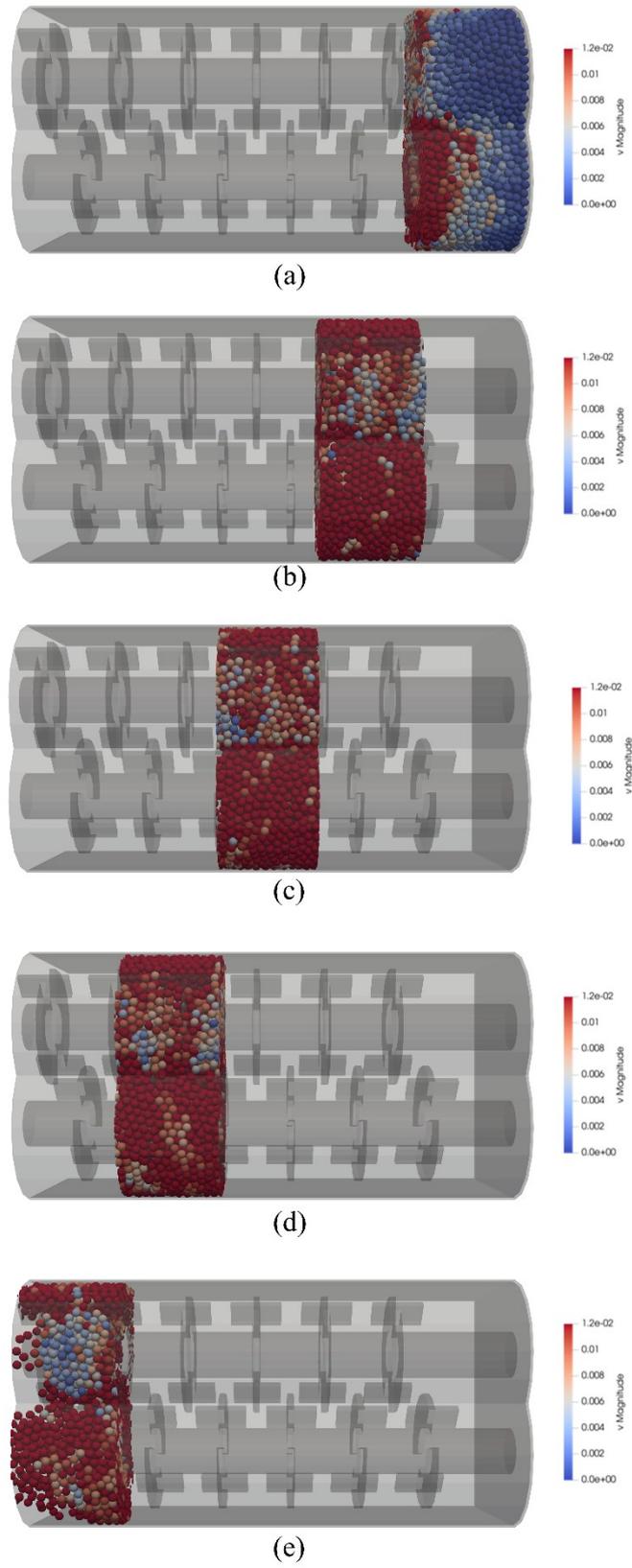
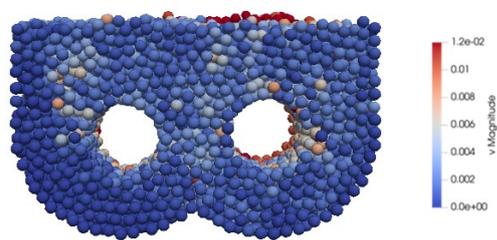
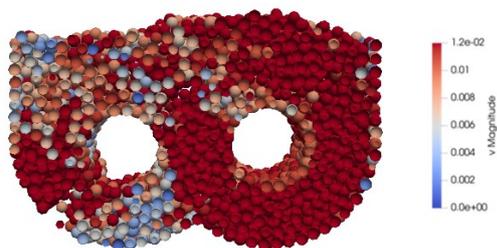


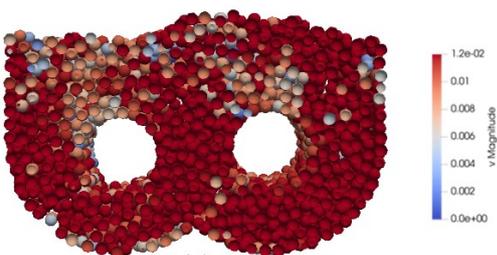
Figura 4-13: Vista inferior do mapa de velocidade média para (a) Região 1 (b) Região 2 (c) Região 3 (d) Região 4 (e) Região 5



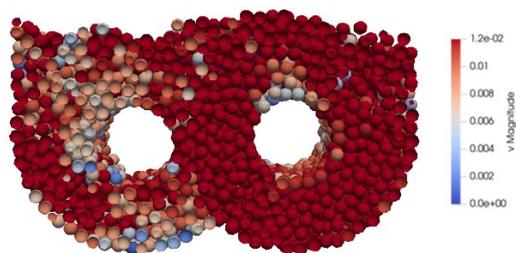
(a)



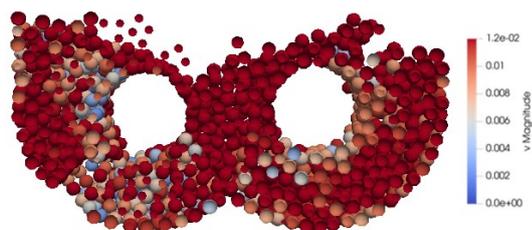
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4-14: Vista frontal do mapa de velocidade média para (a) Região 1 (b) Região 2 (c) Região 3 (d) Região 4 (e) Região 5

É possível verificar, a partir da Figura 4-12 (a), Figura 4-13 (a) e Figura 4-14 (a), que a ausência de pás e parede terminal da região 1 têm uma forte influência na estagnação das partículas e baixa velocidade. É possível constatar, também, que o pequeno valor de velocidade encontrado está ligado à transferência de quantidade de movimento pelas partículas que estão em contato com as pás da região 2.

Nota-se, através dos dados da Figura 4-11, que há incremento de velocidade entre as regiões 2 e 3 e entre as regiões 3 e 4. Isso revela que, além da transferência de quantidade de movimento que existe das pás para as partículas, há também transferência entre as partículas, fazendo com que elas ganhem velocidade dentro do leito. O fato dessas partículas estarem mais distantes da região de estagnação favoreceram também o aumento da velocidade entre elas. Há poucas regiões de estagnação tanto na região superior quanto na região inferior, evidenciados na Figura 4-12 (b), Figura 4-12 (c), Figura 4-12 (d), Figura 4-13 (b), Figura 4-13 (c) e Figura 4-13 (d).

A região 5 apresenta os maiores valores de velocidade devido à transferência de quantidade de movimento que recebe tanto das pás quanto das partículas das outras regiões, e porque há a ausência da parede terminal, fazendo com que suas partículas não percam tanto sua energia cinética.

Foi possível verificar, a partir das vistas frontais exibidas na Figura 4-14, que as partículas recebem maior quantidade de movimento quando estão mais próximas do eixo de rotação, como era esperado, e menor quantidade quando estão mais distantes das pás e dos eixos. Apenas a região 1 apresentou baixa energia cinética entre suas partículas devido ao efeito de parede terminal e ausência de pás.

#### **4.4 Aplicação dos resultados no processo de secagem**

O estudo demonstrou que quanto maior o tamanho das partículas e a velocidade de rotação dos eixos, maiores serão a velocidade de média destas no leito, o que pode estar relacionado com a facilidade com a qual partículas maiores são capazes de absorver e transferir energia cinética entre elas para a configuração do sistema de agitação do equipamento estudado. Foi observado que a velocidade de rotação das pás é a variável que mais impacta na velocidade média das partículas, fator importante para manter a homogeneidade no leito e garantir uma secagem uniforme. Além disso, a altura do leito também demonstrou influência no

comportamento das partículas, já que, para graus de preenchimento superiores ao diâmetro de giro das pás, foi observada uma zona de estagnação, fato que deve ser interpretado como sobrecarga operacional, já que afeta a exposição das partículas na superfície de maneira uniforme, o que pode comprometer o processo de secagem.

O estudo também permitiu identificar a necessidade de uma melhoria estrutural no *Microwave Paddle Dryer*. No caso, a adição de uma pá de agitação na região próxima a de alimentação, a fim de garantir uma melhor mistura nessa área, visto que os resultados apresentaram uma velocidade média próxima a zero, o que diminuiu significativamente o grau de mistura em relação ao restante do leito.

Levando em consideração as observações acima, fica evidente que para garantir uma boa operação, o equipamento deve manter uma velocidade alta de rotação do eixo de agitação com o intuito de manter um bom grau de mistura e um tempo adequado de exposição das partículas na superfície, assim como uma altura de leito que permita a máxima exposição das partículas sem o comprometimento da eficiência de mistura, ou seja, evitando a operação com zonas de estagnação acima das pás de agitação. A partir do modelo encontrado no Item 4.2, os pontos de otimização para maximizar a velocidade média foram  $x_1 = 1,42$  (diâmetro da partícula),  $x_2 = -1,42$  (altura do leito) e  $x_3 = 1,42$  (velocidade de rotação dos eixos), ou seja, os maiores níveis para diâmetro e velocidade de rotação, e o menor nível para altura do leito. Vale ressaltar que a diâmetro de giro das pás é de 140 mm, e nos ensaios de secagem, a depender da taxa de alimentação, é recomendado que o grau de preenchimento para operação batelada não ultrapasse esse valor, visto que pode gerar zonas de estagnação na região superior e comprometer a separação.

Como os ensaios discutidos são numéricos, há a necessidade de realizar testes experimentais de secagem nessas condições para validar os resultados. Para esse estudo inicial, a metodologia Lagrangeana apresentou resultados satisfatórios.

---

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

---

Neste capítulo é apresentada uma síntese das principais conclusões obtidas a partir do estudo da dinâmica de escoamento da unidade *Microwave Paddle Dryer*, bem como sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

#### 5.1 Conclusões

##### 5.1.1 *Calibração dos parâmetros*

- A partir da realização do planejamento composto central, o processo de calibração foi aplicado tornando possível a determinação da combinação de parâmetros ideais para avaliação da velocidade média das partículas nas configurações estudadas;
- A combinação de parâmetros encontrada foi também comparada aos valores obtidos experimentalmente, validando a técnica de medida utilizada;
- A técnica de análise de imagem foi empregada de maneira satisfatória para determinação dos índices de segregação nos intervalos de tempo pré-determinados em todas as configurações e condições estudadas.

##### 5.1.2 *Análise quantitativa da velocidade média do leito*

- As análises dos perfis de velocidade média corroboraram com os estudos previamente discutidos, mostrando a influência dessas variáveis sobre as partículas;
- O aumento da velocidade de rotação e do diâmetro da partícula promoveram o acréscimo na energia cinética das partículas no leito, já a altura do leito apresentou alterações ligeiramente sensíveis no comportamento do leito após atingir o regime permanente;
- Não foi possível concluir sobre o efeito combinado do diâmetro da partícula com o grau de preenchimento, sendo que essa análise carece de uma investigação mais detalhada.

### 5.1.3 *Análise quantitativa da velocidade média por região:*

- Observou-se que, além do aumento da energia cinética nas partículas por meio dos eixos de rotação, há também transferência de quantidade de movimento entre as partículas e acréscimo da velocidade média entre as regiões;
- A região 1 apresentou os menores valores de velocidade devido à presença das paredes terminais e da ausência de pás, recebendo energia cinética somente pelo movimento giratório do eixo. Já as regiões 2, 3 e 4 apresentaram valores crescentes de velocidade média devido à transferência de quantidade de movimento do eixo de rotação e entre as partículas.
- A região 5 evidenciou a maior velocidade devido ao recebimento de quantidade de movimento das pás e das partículas das regiões adjacentes e pela ausência de parede terminal.
- A metodologia Lagrangeana apresentou resultados satisfatórios nesse estudo inicial no equipamento *Microwave Paddle Dryer*.

## 5.2 **Sugestão para trabalhos futuros**

Algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- Estudar detalhadamente o efeito da altura do leito e diâmetro da partícula nas condições apresentadas neste trabalho, realizando mais simulações em outras condições;
- Dar continuidade às simulações numéricas, aumentando o tamanho do equipamento e, assim, aproximar-se cada vez mais do tamanho real;
- Estudar o fenômeno da difusividade e da segregação para diversas condições operacionais, variando diâmetro da partícula, grau de preenchimento, frequência de rotação e densidade do material;
- Realizar calibrações e simulações para materiais mais finos e menos homogêneos, aproximando-se do cascalho.
- Encontrar condições ótimas de operação por meio de ensaios numéricos e realizar uma secagem com o material para validação;
- Investigar como características geométricas do equipamento, como a angulação das pás, podem afetar o fenômeno da segregação e difusividade.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

AI, J. et al. Assessment of rolling resistancemodels indiscrete element simulations. **Powder Technology**, v. 206, n. 3, p. 269-282, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.09.030>>.

ALDER, B. J.; WAINWRIGHT, T. E. Phase Transition for a Hard Sphere System.. **The Journal of Chemical Physics**, v. 27, n. 5, p. 1208-1209, 1957. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1743957>>.

AMARAL, P. L. F. **Influência da pressão nominal de contato no coeficiente de atrito estático em plano inclinado automatizado**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. [S.l.]. 2013.

ASM HANDBOOK. Friction, lubrication and wear technology. **ASM International HandBook Committee**, v. 18, 1992.

ASTM G194-08. **Standard test method for measuring rolling friction characteristics of a spherical shape on a flat horizontal plane**. [S.l.]. 2013.

BRANDÃO, R. J. **Estudo da Segregação de Material Granular Abordagem Numérica Lagrangeana**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2017.

BRANDÃO, R. J. **Investigação Numérica e Experimental do Escoamento Granular e dos Fenômenos de Segregação Radial e Axial em Tambor Rotatório**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2019.

BUIST, K. A. E. A. On an efficient hybrid soft and hard sphere collision integration scheme for DEM. **Chemical Engineering Science**, v. 153, p. 363-373, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2016.07.030>>.

CAMSIZER. **Operating Manual Particle Size Analysis System CAMSIZER**. [S.l.]: Retsch Technology, 2010.

CHARLOU, C. et al. A new methodology for measurement of sludge residence time distribution in a paddle dryer using X-ray fluorescence analysis. **Water Research**, França, v. 69, p. 1-8, Novembro 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.11.005>>

CHEN, H. et al. Numerical investigation on angle of repose and force network from granular pile in variable gravitational environments. **Powder Technology**, v. 283, p. 607–617, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.05.017>>

CORMEN, T. H. et al. **Introduction to Algorithms, Third Edition**. Third. ed. [S.l.]: [s.n.], 2009. 43,44 p.

CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. **Géotechniq**, n. 1, p. 47-65, 1979. Disponível em: <<https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>>

CUNHA, R. N. et al. Repose angle of monoparticles and binary mixture: An experimental and simulation study. **Powder Technology**, v. 303, p. 203-211, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.09.023>>.

DANBY, M.; SHRIMPTON, J.; PALMER, M. On the optimal numerical time integration for DEM using Hertzian force models. **Computers & Chemical Engineering**, v. 58, p. 211-222, 11 Novembro 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.06.018>>

DENG, W.; SU, Y.; YU, W. **Theoretical calculation of heat transfer coefficient when**. International Symposium on Environmental Science and Technology. Shanghai: Elsevier. 2013. p. 709-715. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.04.096>>

EBRAHIMI, M. et al. The effect of impeller configurations on particle mixing in an agitated paddle mixer. **Powder Technology**, Toronto - Canadá, n. 332, p. 158-170, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.03.061>>

EBRAHIMI, M. et al. Assessment of bi-disperse solid particles mixing in a horizontal paddle mixer through experiments and DEM. **Powder Technology**, Toronto, Canadá, n. 381, p. 129-140, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.11.041>>

GOLSHAN S., Z. R. . N. H. R. . M. N. Granular mixing in nauta blenders. **Powder Technol**, n. 305, p. 279–288, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.09.059>>

HASSANPOUR, A. et al. Analysis of particle motion in a paddle mixer using Discrete Element Method (DEM). **Powder Technology**, n. 206, p. 189-194, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.07.025>>

HUTCHINGS, I. M. Leonardo da Vinci's studies of friction, p. 51-66, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.04.019>>

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Cambridge: Butterworth-Heinemann, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100910-9.00003-9>>

IBAMA. **Instrução Normativa 1, de 02 de janeiro de 2018**. IBAMA. Brasília. 2018.

LI, D. et al. Numerical simulation of different flow regimes in a horizontal rotating ellipsoidal drum. **Powder Technology**, v. 291, p. 86–96, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.12.007>>.

LI, J.; WASSGREN, C.; LITSTER, J. D. Multi-scale modeling of a spray coating process in a paddle mixer/coater: the effect of particle size distribution on particle segregation

and coating uniformity. **Chemical Engineering Science**, West Lafayette - USA, n. 95, p. 203-210, 2013. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.03.014>>

LI, Y.; XU, Y.; THORNTON. A comparison of discrete element simulations and experiments for "sandpiles" composed of spherical particles. **Powder Technology**, v. 160, p. 219–228, 2005. ISSN 3. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.09.002>>

LIMA, R. M. **Estudo da dinâmica de partículas em tambores rotatórios empregando a abordagem numérica Lagrangeana**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2017.

LYU, L.; CHEN, S.; WANG, F. Two dimensional modeling of sewage sludge flow in a double-axis. **Waste Management**, Hangzhou, v. 124, p. 63-71, Janeiro 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.018>>

MACHINERY, N. Nara Machinery. **Nara Machinery**, 2021. Disponível em: <<http://www.nara-m.co.jp/english/product/dryer/npd.html>>. Acesso em: 30 Setembro 2021.

MATUTTIS, H. G.; CHEN, J. Understanding the discrete element method, Singapore: Wiley, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/9781118567210>>

MILHÉ, M.; SAUCEAU, M.; ARLABOSSE, P. Modeling of a continuous sewage sludge paddle dryer by coupling Markov chains with penetration theory. **Applied Mathematical Modelling**, França, v. 40, p. 8201-8216, Abril 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.04.006>>

MOTA, A. C. S. **Propriedades dielétricas e cinética de secagem de cascalhos de perfuração de poços de petróleo e gás utilizando micro-ondas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2018.

MUELLER, P. et al. A novel approach to evaluate the elastic impact of spheres on thin plates. **Chemical Engineering Science**, v. 138, p. 689–697, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.08.056>>.

NASCIMENTO, S. M. **Estudo Da Dinâmica De Partículas Em Tambor Rotatório Com Suspensores: Análise Experimental e Numérica Utilizando Abordagens Euleriana e Lagrangeana**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2018.

PASHA M., H. A. . A. H. . T. H. S. . B. A. . G. M. A comparative analysis of particle tracking in amixer by discrete element method and positron emission particle tracking. **Powder Technology**, Beijing - China, n. 270, p. 569 - 574, Setembro 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.09.007>>

PASSOS, A.; SILVA, C. Desenvolvimento de tribômetro do tipo plano inclinado para medição de coeficiente de atrito estático, São Luiz, 2012.

PENG, B. **Discrete Element Method (DEM) contact models applied to pavement Simulation**. Thesis (Master of Science) - Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg. 2014.

PEREIRA, M. S. et al. Microwave Treatment of Drilled Cuttings Contaminated by Synthetic Drilling Fluid. **Separation and Purification Technology**, v. 124, p. 68-73, 2014. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.01.011>>

PETRI, I. J. **Secagem por micro-ondas na descontaminação de cascalhos de perfuração**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2014.

PETRI, I. J. **Descontaminação de cascalhos de perfuração utilizando um secador micro-ondas semi-industrial em regime contínuo**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2017.

PETRI, I. J. et al. Microwave remediation of oil well drill cuttings. **Journal Petroleum Science and Engineering**, v. 134, p. 23–29, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.07.022>>

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, p. 591-604, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.11.022>>

ROBINSON, J. P. et al. Remediation of Oil-contaminated Drill Cuttings using Continuous Microwave Heating. **Chemical Engineering Journal**, v. 152, p. 458-463, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.05.008>>

ROBINSON, J. P. et al. Scale-Up And Design Of A Continuous Microwave Treatment System for the Processing of Oil-contaminated Drill Cuttings. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 88, p. 146-154, 2010.

ROBINSON, J. P. et al. Microwave Remediation of Hydrocarbon-contaminated Soils – Scale-up using Batch Reactors. **Separation and Purification Technology**, v. 96, p. 12-19, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.05.020>>

ROSSI, A. S. . F. M. G. . P. M. S. . A. C. H. Kinetics of microwave heating and drying of drilling fluids and drill cuttings. **Dry. Technol**, 35, p. 1130–1140, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1233425>>

SANTOS, J. M. **Otimização Do Processo Em Batelada De Descontaminação De Cascalho De Perfuração Via Aquecimento Por Micro-Ondas**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2018.

SANTOS, J. M. et al. Microwave Drying of Drilled Cuttings in the Context of Waste Disposal and Drilling Fluid Recovery. **Energy Technology**, v. 2, p. 832-838, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/ente.201402053>>

SANTOS, R. L. **Estudo da Fluidodinâmica de Inertes em Secador Rotatório Não-Convencional e Sua Relação com a Secagem da Polpa de Camu-Camu**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2020.

SHANG, H. et al. Treatment of Oil-Contaminated Drill Cuttings by Microwave Heating in a High-Power Single-Mode Cavity. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 44(17), p. 6837-6844, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/ie0500772>>

SHANG, H. et al. Microwave Treatment of Oil-contaminated North Sea Drill Cuttings in a High Power Multimode Cavity. **Separation and Purification Technology**, v. 49, p. 84-90, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2005.08.012>>

SHANG, H. et al. Theoretical Study of Microwave Enhanced Thermal Decontamination of Oil Contaminated Waste. **Chemical Engineering & Technology**, v. 30(1), p. 121-130, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/ceat.200600279>>

SHENGYONG, L. et al. Atmospheric emission characterization of a novel sludge drying and co-combustion system. **Journal of Environmental Sciences, China**, v. 25, n. 10, p. 2088-2092, Dezembro 2013. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60272-1](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60272-1)>

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

THORNTON, C. **Granular dynamics, contact mechanics and particle system simulations: DEM study**. [S.l.]: Springer, v. 24, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-3-319-18711-2>>. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-3-319-18711-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-18711-2_3)>

VIOLA, E. et al. Evaluation of a pilot-scaled paddle dryer for the production of ethanol from lignocellulose including inhibitor removal and high-solids enzymatic hydrolysis. **Biotechnology Reports**, Napoli, v. 9, p. 38-45, Janeiro 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.btre.2015.12.005>>

WANG, L. et al. Experimental determination of parameter effects on the coefficient of restitution of differently shaped maize in three-dimensions. **Powder Technology**, v. 284, p. 187–194, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.042>>

YAN, J.-H. et al. Emission characteristics of volatile compounds during sludges drying process. **Journal of Hazardous Materials**, Hangzhou, v. 162, p. 186-192, Novembro 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.022>>

YARAGHI, A. et al. Mixing assessment of non-cohesive particles in a paddle mixer through experiments and discrete element method (DEM). **Advanced Powder Technology**, Toronto - Canadá, n. 29, p. 2693-2706, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.07.019>>

YUAN, Q. et al. The effect of paddle configurations on particle mixing in a soil-fertilizer continuous mixing device. **Powder Technology**, Beijing, v. 391, p. 292–300, Junho 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.06.022>>

ZENER, C. Large plates. [S.l.]: [s.n.], v. 59, 1941. Disponível em: <<https://doi.org/10.1103/PhysRev.59.669>>

ZHENG, Q. J.; ZHU, H. P.; YU, A. B. Finite element analysis of the rolling friction of a viscous particle on a rigid plane. **Powder Technology**, v. 207, p. 401–406, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.11.026>>

ZHOU, Y. C. C. et al. Rolling friction in the dynamic simulation of sandpile formation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 269, p. 536–553, 1999. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(99\)00183-1](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(99)00183-1)>

ZHU, H. P. et al. Discrete particle simulation of particulate systems: A review of major applications and findings. **Chemical Engineering Science**, v. 63, p. 5728-5770, 2008. ISSN 23. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.08.006>>.