

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

JOÃO PEDRO ALVES DE AZEVEDO BARROS

**ANÁLISE DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DO  
LEITO DE JORRO COM AGITADOR MECÂNICO E DO  
EQUIPAMENTO CONVENCIONAL**

SÃO CARLOS

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

JOÃO PEDRO ALVES DE AZEVEDO BARROS

**ANÁLISE DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DO  
LEITO DE JORRO COM AGITADOR MECÂNICO E DO  
EQUIPAMENTO CONVENCIONAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. José Teixeira Freire

SÃO CARLOS

2022



# UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

---

## Folha de Aprovação

---

Defesa de Tese de Doutorado do candidato João Pedro Alves de Azevedo Barros, realizada em 24/03/2022.

### Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Jose Teixeira Freire (UFSCar)

Prof. Dr. Gustavo Nakamura Alves Vieira (UNESP)

Profa. Dra. Maria do Carmo Ferreira (UFSCar)

Prof. Dr. Nivaldo Aparecido Corrêa (USP)

Prof. Dr. Rodrigo Béttega (UFSCar)

## **DEDICATÓRIA**

Acima de tudo, dedico essa tese de doutorado a Deus, que me guiou e me deu forças para continuar sempre em frente e nunca ter me deixado desistir de nada.

Aos meus pais (Euvalda e Joaquim) e meus irmãos (João Vitor e Lucas) que conviveram comigo em todos os momentos, principalmente nos mais difíceis, sempre enfrentando como uma família unida qualquer barreira que aparecesse na minha vida. Agradeço por toda ajuda e conselhos.

À minha avó (Eunice), que em toda sua experiência de vida me proporcionou maravilhosos conselhos e sempre esteve preocupada com meu crescimento e minha felicidade.

## AGRADECIMENTOS

Sinceramente agradeço,

- À Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, por concretizarem um sonho de me tornar doutor em engenharia química.
- Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – PPGEQ da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, por fornecer todo o suporte físico (materiais e equipamentos) e técnico para a realização dos experimentos.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ, por fornecer todo o auxílio financeiro para a realização desta tese de doutorado.
- Ao meu orientador, Prof. Dr. José Teixeira Freire, um excelente profissional e um exemplo para sociedade acadêmica. Além de me orientar durante os seis anos na pós-graduação, foi um mentor e amigo. Agradeço pela atenção e dedicação em me orientar, além de todos os ensinamentos e apoio nos momentos mais difíceis. Obrigado por toda consideração comigo.
- Aos integrantes da banca examinadora (Maria do Carmo Ferreira, Rodrigo Béttega, Gustavo Nakamura Alves Vieira e Nivaldo Aparecido Corrêa), por estarem disponíveis e presentes no momento da defesa, sugerindo modificações, dando sugestões e contribuindo para aperfeiçoar esse trabalho.
- Aos professores do PPGEQ, que ao longo do mestrado e doutorado contribuíram de alguma forma para a finalização desse trabalho.
- Aos técnicos e funcionários da UFSCar, que contribuíram com diversas atividades que foram essenciais para o progresso desse trabalho. Agradeço principalmente ao departamento de controle ambiental pelas análises de granulometria com os técnicos Marcos e Gabriel, além do técnico Edilson do centro de secagem (CS – PPGEQ).
- Aos meus amigos e colegas da UFSCar que me deram apoio e contribuíram para que essa defesa acontecesse. Agradeço por todos os momentos de alegria ou tristeza que contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.
- A minha amada companheira Valentine, que me proporcionou momentos inesquecíveis. Por festejar comigo nos melhores e por me consolar nos piores dias, mas em ambos me fazer sorrir.

“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar  
uma alma humana seja apenas outra alma humana”

Carl Gustav Jung

## SUMÁRIO

RESUMO.....	XIV
ABSTRACT .....	XVI
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Leito de jorro.....	4
2.1.1 Comportamento fluidodinâmico.....	5
2.1.2 Condições operacionais e estabilidade do leito .....	7
2.1.3 Regime do jorro .....	8
2.1.4 Secagem de pastas e soluções.....	9
2.2 Leito de jorro modificado .....	12
2.3 Leito de jorro mecânico .....	13
2.4 Principais estudos com leito de jorro mecânico.....	15
CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	17
3.1 Unidade experimental .....	17
3.2 Projeto dos agitadores mecânicos .....	19
3.3 Materiais utilizados .....	22
3.3.1 Partículas Inertes.....	22
3.3.2 Pastas e suspensões.....	24
3.4 Procedimento experimental .....	25
3.4.1 Caracterização fluidodinâmica .....	25
3.4.2 Velocidade do ar.....	26
3.4.3 Correlação matemática dos dados .....	26
3.4.4 Tempo de ciclo médio das partículas .....	28
3.4.5 Secagem de pastas .....	29
3.4.6 Granulometria do produto .....	30

CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	32
4.1 Comportamento fluidodinâmico do leito de jorro convencional e do com agitação mecânica.....	33
4.1.1 Curva fluidodinâmica para leito de jorro com agitador mecânico .....	34
4.1.2 Curva fluidodinâmica para diferentes agitadores .....	40
4.2 Velocidade do ar .....	46
4.3 Redução Relativa da vazão de ar e propriedades das partículas.....	52
4.4 Modificação do número e da distância entre as pás do agitador.....	61
4.5 Ajuste dos dados à uma função.....	63
4.6 Tempo de ciclo e tempo que a partícula fica na superfície.....	71
4.6.1 Tempo de ciclo em diferentes agitadores .....	72
4.6.2 Modelo empírico do tempo de ciclo .....	79
4.7 Secagem de pasta com diferentes configurações do leito de jorro .....	81
4.7.1 Efeito das diferentes configurações do leito de jorro na secagem de carbonato de cálcio .....	82
4.7.2 Efeito das diferentes configurações do leito de jorro na secagem de leite 86	
4.7.3 Efeito da velocidade de rotação sobre a cinética de secagem .....	90
4.7.4 Efeito da pasta sobre o leito de jorro com agitador mecânico.....	92
4.7.5 Análise energética da secagem em leito de jorro com e sem agitação .....	95
4.7.6 Queda de pressão no leito de jorro .....	99
4.7.7 Umidade do produto .....	104
4.8 Análise da granulometria do produto final .....	106
CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES.....	115
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	118



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> – Curva característica do leito de jorro cônico-cilíndrico.....	6
<b>Figura 2.2</b> – Transição de fase (A) e diagrama de regime (B) em função do aumento da velocidade do fluido. ....	9
<b>Figura 2.3</b> – Processo de formação e aglomeração de produto no leito de jorro. ....	10
<b>Figura 2.4</b> – Leito de jorro convencional e suas respectivas modificações. Legenda: Leito de jorro: (A) convencional; (B) cônico; (C) draft tube; (D) com confinador de fonte; (E) mecânico.....	12
<b>Figura 3.1</b> – Diagrama esquemático da unidade experimental usada nos experimentos fluidodinâmicos. Dimensões em centímetros. ....	18
<b>Figura 3.2</b> – Dimensões dos agitadores de pás-retas. Medidas em centímetros.....	21
<b>Figura 3.3</b> – Agitador de pás-retas (A) e pás-inclinadas (B). Agitadores utilizando três conjuntos de pás na forma de cruz (sem espaçamento entre si), fixados através de um parafuso na lateral do agitador e preso na haste. ....	21
<b>Figura 3.4</b> – Agitador tipo parafuso helicoidal.....	22
<b>Figura 4.1</b> – Queda de pressão do leito em função da vazão de ar para diferentes velocidades de rotação do agitador.....	33
<b>Figura 4.2</b> – Queda de pressão em função da vazão de ar para o leito de jorro convencional (1) e com agitador mecânico (2) para pás-retas (120 rpm). Dados: Esferas de vidro, 3 kg e 2,2 mm (Ensaio E2). ....	35
<b>Figura 4.3</b> – Queda de pressão em função da vazão de ar no leito de jorro com agitador mecânico com diferentes velocidades de rotação do agitador de pás-retas. Dados: Massa de partículas de vidro de 3 kg e diâmetro de 2,2 mm (Ensaio E2). ....	37
<b>Figura 4.4</b> – Queda de pressão em função da vazão de ar para o leito de jorro convencional e com agitação mecânica para diferentes configurações de agitadores. Dados: Partículas de vidro com 3kg, 2,2 mm (Ensaio E2) e 60 rpm. ....	41
<b>Figura 4.5</b> – Queda de pressão em função da vazão de ar para leito de jorro com agitador mecânico com parafuso helicoidal. Dados: Partículas de vidro, 3 kg e 2,2 mm. ....	42
<b>Figura 4.6</b> – Queda de pressão em função da vazão de ar para o leito de jorro com agitador mecânico de parafuso helicoidal. Dados: Partículas de vidro, 2,2mm e 120 rpm. Regiões A, B, C e D foram delimitadas baseando na massa de 3 kg de partículas. ....	44
<b>Figura 4.7</b> – Mapa de velocidade do ar na secção transversal do leito de jorro com agitador mecânico de pás-retas. Dados: Partículas de vidro de 3 kg e 2,2 mm (ensaio E2).	

Vazão de ar de $0,55 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ (A); $0,88 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ (B); $1,41 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ (C). Desvio padrão menor do que 10% para 98% das medias obtidas. ....	48
<b>Figura 4.8</b> – Foto do interior do leito de jorro com agitador mecânico para diferentes velocidades de rotação do agitador de pás-retas.....	49
<b>Figura 4.9</b> – Perfil de velocidade do ar com as regiões de movimentação das partículas para o agitador de pás-retas. Dados: Partículas de vidro de 3 kg e 2,2 mm (ensaio E2).	49
<b>Figura 4.10</b> – Velocidade do ar em função do raio do leito de jorro convencional e com agitação mecânica. Velocidade de rotação de 60 rpm (A); 120 rpm (B). Dados: Partículas de vidro de 3 kg, 2,2 mm e $Q = 0,88 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . ....	51
<b>Figura 4.11</b> – Redução relativa da vazão de ar (RR) em função da velocidade de rotação para o agitador de pás-retas. Ensaios E1, E3, E4 e E6 (A); E7, E9, E10 e E12 (B).....	53
<b>Figura 4.12</b> – Redução Relativa da vazão de ar (RR) em função da velocidade de rotação do agitador para diferentes configurações dos agitadores. Dados: partículas de vidro 2,2 mm: (A) 2 kg (ensaio E1) e (B) 4 kg (ensaio E3).....	57
<b>Figura 4.13</b> – Redução relativa da vazão de ar para diferentes números de pás para o agitador de pás-retas. Dados: Alumina – 2 kg (E7) e 3 kg (E8) e Polietileno – 2 kg (E10) e 3 kg (E11). ....	61
<b>Figura 4.14</b> – Redução relativa da vazão de ar em função dos ensaios para diferentes espaçamentos das pás do agitador de pás-retas. Dados: Polietileno – 2 kg (E10), 3 kg (E11) e 4 kg (E12). ....	62
<b>Figura 4.15</b> – Vazão de ar em função de $\phi$ para diferentes condições operacionais (E1-E12) para o agitador de pás-retas. Dados: E1-E3 (Vidro – 2,2 mm), E4-E6 (Vidro – 4,4 mm), E7-E9 (Alumina – 3,7 mm) e E10-E12 (Polietileno – 3,7 mm). ....	64
<b>Figura 4.16</b> – Queda de pressão máxima do leito em função do número de Reynolds da vazão de ar ( $Re_v$ ) para o agitador de pás-retas.....	66
<b>Figura 4.17</b> – Velocidade de mínimo jorro em função da velocidade de rotação do agitador para o agitador de pás-retas. Diferentes partículas (A); diferentes massas de partículas (B). Dados experimentais (pontos); Dados calculados (Linhas).....	68
<b>Figura 4.18</b> – Queda de pressão máxima em função da velocidade de rotação para o agitador de pás-retas. Diferentes partículas (A); diferentes massas de partículas (B). Dados experimentais (pontos); Dados calculados (Linhas). ....	69
<b>Figura 4.19</b> – Queda de pressão em função da velocidade de rotação para o agitador de pás-retas. Diferentes partículas (A); diferentes massas de partículas (B). Dados experimentais (pontos); Dados calculados (Linhas).....	70

<b>Figura 4.20</b> – Histograma do tempo de ciclo para pás-retas com velocidades de rotação de 90 rpm (A), 120 rpm (B) e 240 rpm (C). .....	75
<b>Figura 4.21</b> – Tempo de ciclo das partículas para o agitador de pás-retas. A – $Q_{al}$ para cada velocidade de rotação; B – Velocidade de rotação de 120 rpm. ....	76
<b>Figura 4.22</b> – Tempo de ciclo das partículas para o agitador de pás-inclinadas. A – $Q_{al}$ para cada velocidade de rotação; B – Velocidade de rotação de 120 rpm. ....	76
<b>Figura 4.23</b> – Tempo de ciclo das partículas para o agitador de parafuso helicoidal. A – $Q_{al}$ para cada velocidade de rotação; B – Velocidade de rotação de 120 rpm. ....	77
<b>Figura 4.24</b> – Tempo médio de ciclo das partículas para diferentes agitadores para velocidade de rotação de 120 rpm. A – Vazão de ar de $1,18 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ; B – Vazão de ar de $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . ....	78
<b>Figura 4.25</b> – Tempo de ciclo médio em função da velocidade de rotação para diferentes agitadores baseando na $Q_{al}$ . Dados experimentais (pontos); Dados calculados (Linhas). ....	80
<b>Figura 4.26</b> – Umidade relativa em função do tempo de secagem de carbonato de cálcio para diferentes configurações do agitador mecânico. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . ....	82
<b>Figura 4.27</b> – Temperatura do ar na saída em função do tempo de secagem de carbonato de cálcio para diferentes configurações do agitador mecânico. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . ....	84
<b>Figura 4.28</b> – Umidade relativa em função do tempo de secagem de carbonato de cálcio para diferentes configurações do agitador mecânico. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm. ....	85
<b>Figura 4.29</b> – Temperatura do ar na saída em função do tempo de secagem de carbonato de cálcio para diferentes configurações do agitador mecânico. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm. ....	86
<b>Figura 4.30</b> – Umidade relativa em função do tempo de secagem de leite para diferentes configurações do agitador mecânico. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . ....	87
<b>Figura 4.31</b> – Temperatura do ar na saída em função do tempo de secagem de leite para diferentes configurações. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . ....	88
<b>Figura 4.32</b> – Umidade relativa (A) e temperatura do ar na saída (B) para secagem de leite. Dados: Vazão de ar de $1,26$ (Pás-retas) e $1,04 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ (Parafuso). ....	88

<b>Figura 4.33</b> – Interior do leito de jorro na secagem de leite desnatado com agitador tipo parafuso helicoidal. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de 1,04 m <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> . .....	89
<b>Figura 4.34</b> – Umidade relativa em função do tempo de secagem para agitador de pás-retas. Dados: Secagem de carbonato de cálcio e vazão de ar de 1,26 m <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> . .....	90
<b>Figura 4.35</b> – Temperatura do ar na saída em função do tempo de secagem para agitador de pás-retas. Dados: Secagem de carbonato de cálcio e vazão de ar de 1,26 m <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> . ..	91
<b>Figura 4.36</b> – Umidade relativa em função do tempo de secagem para agitador de pás-retas. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de 1,26 m <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> . .....	93
<b>Figura 4.37</b> – Temperatura do ar na saída em função do tempo de secagem para agitador de pás-retas. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de 1,26 m <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> . .....	94
<b>Figura 4.38</b> – Eficiência térmica em função do tempo de secagem de água para diferentes configurações do leito de jorro. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm. ....	95
<b>Figura 4.39</b> – Eficiência térmica em função do tempo de secagem de carbonato de cálcio para diferentes configurações do leito de jorro. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de 0,88 (Pás-inclinadas), 1,26 (Pás-retas), 1,04 (Parafuso) e 1,41 m <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> (LJC). .....	96
<b>Figura 4.40</b> – Eficiência térmica em função do tempo de secagem de leite para diferentes configurações do leito de jorro. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm. ....	97
<b>Figura 4.41</b> – Queda de pressão adimensional no leito de jorro em função do tempo de secagem para diferentes configurações de agitadores e leito de jorro convencional. Dados: Vazão de ar de 1,41 m <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> , velocidade de rotação de 120 rpm e carbonato de cálcio. ....	100
<b>Figura 4.42</b> – Queda de pressão adimensional no leito de jorro em função do tempo de secagem de leite para diferentes configurações de agitadores e leito de jorro convencional. Dados: Vazão de ar de 1,41 m <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> e velocidade de rotação de 120 rpm. ....	101
<b>Figura 4.43</b> – Queda de pressão adimensional no leito de jorro em função do tempo de secagem de carbonato de cálcio para diferentes configurações de agitadores e para o LJC. ....	102
<b>Figura 4.44</b> – Queda de pressão adimensional no leito de jorro em função do tempo de secagem de leite para diferentes configurações de agitadores. ....	103

<b>Figura 4.45</b> – Queda de pressão adimensional no leito de jorro em função do tempo de secagem de CaCO <sub>3</sub> para diferentes velocidades de rotação. Dados: Pás-retas e vazão de ar de 1,26 m <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> .....	103
<b>Figura 4.46</b> – Tamanho das partículas em função da fração volumétrica para diferentes tempos de coleta do produto. Dados: Carbonato de cálcio, pás-retas, velocidade de rotação 120 rpm e vazão de ar de 1,26 m <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> .....	107
<b>Figura 4.47</b> – Tamanho das partículas em função da fração volumétrica para diferentes tipos de agitadores mecânicos. Dados: CaCO <sub>3</sub> , velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de 1,41 m <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> .....	108
<b>Figura 4.48</b> – Tamanho das partículas em função da fração volumétrica para diferentes tipos de agitadores mecânicos com velocidade de rotação de 120 rpm. Dados: Carbonato de cálcio, pás-inclinadas, pás-retas e parafuso. ....	109
<b>Figura 4.49</b> – Tamanho das partículas em função da fração volumétrica para diferentes tipos de agitadores mecânicos. Dados: Leite, velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de 1,41 m <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> .....	110
<b>Figura 4.50</b> – Tamanho das partículas em função da fração volumétrica para diferentes velocidades de rotação do agitador. Dados: CaCO <sub>3</sub> e pás-retas (1,26 m <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ).....	112

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> – Pesquisas envolvendo leite de jorro com agitadores mecânicos. ....	16
<b>Tabela 3.1</b> – Propriedades das partículas e condições experimentais usadas no leite de jorro com e sem agitação mecânica. ....	23
<b>Tabela 3.2</b> – Experimentos realizados para secagem de pastas. ....	30
<b>Tabela 4.1</b> – Parâmetros fluidodinâmicos para todas as velocidades de rotação para agitador de pás-retas. Dados: Partículas de vidro, 3 kg e 2,2 mm (Ensaio E2). ....	39
<b>Tabela 4.2</b> – Parâmetros fluidodinâmicos para diferentes agitadores e o leite de jorro convencional. Dados: Partículas de vidro, 3 kg e 2,2 mm (Ensaio E2). ....	45
<b>Tabela 4.3</b> – Parâmetros fluidodinâmicos para diferentes agitadores. Dados: Massa de partículas de 3 kg e velocidade de rotação de 240 rpm. ....	58
<b>Tabela 4.4</b> – Velocidade de rotação, vazão de ar e tempo médio de superfície, para partículas de alumina 3kg (E8). ....	73
<b>Tabela 4.5</b> – Umidade do produto em base úmido (%) para diferentes condições operacionais no final do processo (70 minutos). ....	104
<b>Tabela 4.6</b> – Tamanho das partículas e valor de span em função do tempo de secagem de carbonato de cálcio com pás-retas (120 rpm e $1,26 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ). ....	107
<b>Tabela 4.7</b> – Tamanho das partículas para diferentes tipos de agitadores na secagem de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). ....	113
<b>Tabela 4.8</b> – Tamanho das partículas para diferentes tipos de agitadores na secagem de leite desnatado. ....	113

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ar	Número de Archimedes	-
Ag	Tipo de agitador	-
$d_p$	Diâmetro da partícula inertes	m
$d_s$	Diâmetro inferior do agitador	m
$D_s$	Diâmetro superior do agitador	m
$D_0$	Diâmetro do bocal de entrada do leito	m
$d_{4,3}$	Diâmetro médio das partículas do produto final	$\mu\text{m}$
$d_{v10}$	Tamanho de partícula a partir do qual 10% do volume das partículas encontram-se abaixo deste valor	$\mu\text{m}$
$d_{v50}$	Tamanho de partícula a partir do qual 50% do volume das partículas encontram-se abaixo deste valor	$\mu\text{m}$
$d_{v90}$	Tamanho de partícula a partir do qual 90% do volume das partículas encontram-se abaixo deste valor	$\mu\text{m}$
g	Aceleração da gravidade	m s <sup>-2</sup>
H	Altura do leito estático	m
M	Massa de partículas	kg
$P_L$	Pressão no leito	Pa
$P_{\text{max}}$	Pressão máxima	Pa
$P_j$	Pressão do jorro estável	Pa
$P_{al}$	Pressão pra agitar o leito	Pa
$P_t$	Pressão no tempo	Pa
$P_{t=0}$	Pressão no tempo zero	Pa
$Q_{al}$	Vazão de ar necessária para agitar o leito	$\text{m}^3 \text{min}^{-1}$
$Q_{mj}$	Vazão de ar de mínimo jorro	$\text{m}^3 \text{min}^{-1}$
$Q_{op}$	Vazão de ar de operação	$\text{m}^3 \text{min}^{-1}$
$Re_a$	Número de Reynolds para agitação	-
$Re_v$	Número de Reynolds para vazão de ar	-
rps	Velocidade de rotação	s <sup>-1</sup>
RR	Redução relativa da vazão de ar	%
$T_s$	Temperatura do ar na saída do leito	°C

$T_{cm}$	Tempo de ciclo médio	s
UR	Umidade relativa	%
$UR_t$	Umidade relativa no tempo	%
$UR_{t=0}$	Umidade relativa no tempo zero	%
$u_{al}$	Velocidade do ar para agitar o leito	$m\ s^{-1}$
$u_{mj}$	Velocidade do ar de mínimo jorro	$m\ s^{-1}$

### LETRAS GREGAS

$\eta$	Eficiência térmica	%
$\rho_b$	Densidade Bulk	$kg\ m^{-3}$
$\rho_p$	Densidade da partículas	$kg\ m^{-3}$
$\rho_g$	Densidade do gás	$kg\ m^{-3}$
$\mu$	Viscosidade do ar	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$
$\varepsilon$	Porosidade do leito	-
$\Omega$	Velocidade de rotação	rpm
$\Delta$	Diferença	-
$\phi$	$\frac{Re_a + Re_v}{Re_a * Re_v}$	-



## RESUMO

O leito de jorro mecânico surgiu como uma modificação do leito de jorro convencional, no intuito de minimizar problemas na movimentação dos sólidos e na necessidade de altas vazões de ar apenas para a existência do regime de jorro. Portanto, o objetivo deste estudo foi analisar as configurações modificadas de um leito de jorro, incorporando três tipos diferentes de agitador mecânico e observar as diferenças relativas ao equipamento convencional. Agitadores de pás-retas, pás-inclinadas e parafuso helicoidal foram usados com diferentes tipos de partículas inertes (vidro, alumina e polietileno). Para a análise, foram utilizadas variáveis como o comportamento fluidodinâmico, perfil de velocidade, redução da vazão de ar, tempo de ciclo, secagem e granulometria. A fluidodinâmica do leito de jorro mecânico depende da geometria do agitador e da sua velocidade de rotação. Nos agitadores com a forma de pás retas ou inclinadas, a fluidodinâmica foi qualitativamente semelhante ao leito de jorro convencional, porém as diferenças entre o leito convencional e os agitados tornam-se significativas à medida que se aumenta a velocidade de rotação do agitador. Por exemplo, em consequência do aumento da rotação do agitador, ocorre a redução dos parâmetros fluidodinâmicos, principalmente em relação a vazão de ar necessária para agitar o leito. De forma análoga, o perfil de velocidade do ar também depende do tipo de agitador, da vazão de ar empregada e da velocidade de rotação, apresentando maiores valores no centro do leito, com exceção do agitador tipo parafuso. Os efeitos da velocidade de rotação e da inclinação das pás na fluidodinâmica foram minimizados a partir de 240 rpm, dependendo da massa das partículas no interior do leito. O agitador de pás-inclinada apresentou o melhor redução da vazão de ar e da queda de pressão, considerando o efeito da velocidade de rotação e os diferentes grupos de partículas, principalmente nos ensaios com maior altura do leito estático. O aumento do número de pás do agitador resultou na redução da vazão de ar e em melhor estabilidade do leito, mas esses resultados foram mais evidentes para baixas velocidade de rotação. O modelo proposto para o agitador de pás-retas forneceu boas previsões em termos da queda de pressão máxima e da vazão de ar. No processo de secagem foi observado que o tempo para atingir o equilíbrio foi diferente para cada uma das configurações, ou seja, as mudanças provocaram alteração no regime transiente do processo de secagem. A velocidade de rotação também é um parâmetro que pode controlar o processo de secagem, sendo que este também afeta as características do produto final, como umidade e

distribuição granulométrica. De modo geral, o uso dos agitadores no leito de jorro proporcionou melhorias significativas, reduzindo a vazão de ar necessária para agitar o leito e queda de pressão, além de proporcionar maior estabilidade ao leito. A inserção do agitador ao leito pode favorecer novas aplicações e também ampliar as faixas de operação do jorro convencional, uma vez que nesse equipamento não há problemas de colapso do jorro e limites geométricos.

**Palavras-chaves:** Fluidodinâmica. Secagem. Leito de jorro. Agitador mecânico.

## ABSTRACT

The mechanical spouted bed emerged as a modification of the conventional spouted bed to minimize problems in the movement of solids and the need for high air flows just for the existence of the spouting regimen. Therefore, this study aimed to analyze the modified spouted bed configurations incorporating three different types of the mechanical stirrer, and to observe the differences relative to the conventional equipment. Straight-blade, inclined-blade, and helical screw agitators were used with different types of inert particles (glass, alumina and polyethylene). For the analysis, variables such as the fluid dynamic behavior, velocity profile, air flow reduction, cycle time, drying and granulometry. The fluid dynamics of the mechanical spouted bed depends on the geometry of the stirrer and its speed of rotational. In the agitators with the form of straight or inclined-blades, the fluid dynamics was qualitatively similar to the conventional spouted bed, however, the differences between the conventional and the agitated bed become significant as the rotation speed of the agitator increases. For example, as a result of the increase in the rotation of the stirrer, there is a reduction in the fluid dynamic parameters, mainly in relation to the air flow required to agitate the bed. Similarly, the air velocity profile will also depend on the type of stirrer, the air flow used and the rotation speed, with higher values in the center of the bed, except for the screw-type stirrer. The effects of rotation speed and blade inclination on fluid dynamics were minimized from 240 rpm, depending on the mass of the particles inside the bed. The inclined-blade stirrer showed the best reduction in airflow and pressure drop, considering the effect of rotation speed and the different groups of particles, mainly in the tests with a greater height of the static bed. The increasing in the number of stirrer blades resulted in reduced air flow and better bed stability, but these results were only more evident at low rotational speeds. The proposed model for the straight-blade stirrer provided good predictions in terms of maximum pressure drop and air flow. In the drying process, it was evident that the time to reach equilibrium was different for each of the configurations, that is, the changes caused a change in the transient regime of the drying process. Rotation speed is also a parameter that can control the drying process, which also affects the characteristics of the final product, such as moisture and granulometric distribution. In general, the use of stirrers in the spouted bed provided significant improvements, reducing the air flow needed to stirrer the bed and pressure drop, in addition to providing greater stability to the bed. The

insertion of the stirrer in the bed can favor new applications and also expand the operating ranges of the conventional spouting, since in this equipment there are no problems of spout collapse and geometric limits.

**Keywords:** Fluid dynamics. Drying. Spout bed. Mechanical stirrer.

## CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

O leito de jorro vem sendo estudado desde sua descoberta em meados de 1954, apresentando como principal contribuição a alta circulação de partículas dentro do leito, a qual permitia secar grãos termicamente sensíveis. Essa era uma ótima vantagem frente ao seu antecessor, o leito fluidizado, até então utilizado para realizar a secagem de sementes e grãos. Desde então, diversos estudos têm sido realizados no intuito de compreender as capacidades e as aplicações do leito de jorro convencional.

Atualmente, o leito de jorro é utilizado em diversas operações químicas e físicas, como por exemplo, revestimento de partículas, como alimentador de sólidos em linhas de transporte pneumático, reatores catalíticos e pirólise (BARCELOS et al., 2020; BILBAO et al., 1987; LIU et al., 2020; SOUSA; FERREIRA, 2020). Além dessas aplicações, o leito de jorro também vem sendo usado na secagem de sólidos, pastas e suspensões (BARROS et al., 2019; BRITO et al., 2020; FREIRE et al., 2012). Essas aplicações são bem-sucedidas graças às vantagens que o leito de jorro pode proporcionar no processo. Suas principais características são leito homogêneo e alta circulação de partículas, a qual promove elevadas taxas de transferência de calor e massa. Para a secagem de pastas, esse equipamento utiliza partículas inertes como meio suporte, que possibilitam a secagem de uma grande variedade de materiais com alto teor de umidade, como polpas, soluções concentradas, efluentes industriais, sangue animal, produtos químicos e farmacêuticos (FREIRE et al., 2012).

Aliado com as vantagens do leito de jorro, também existe o fato do baixo custo de aquisição e construção, o qual facilitou que o leito de jorro se tornasse uma excelente ferramenta de pesquisa para novas técnicas e aplicações. Grupos de pesquisa renomados da área vêm estudando esse equipamento desde a sua criação. Um desses grupos é o Centro de Secagem de pastas e sementes (CS) localizado no Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Com aproximadamente 40 anos de experiência (FREIRE; ALBINI, 2019) em operações com leitos de jorro, o Centro de Secagem contribuiu para a evolução dessa técnica. Apesar do bom desempenho do leito de jorro tradicional, foi observado ao longo dos anos que esse equipamento apresenta algumas desvantagens que o torna inviável em alguns casos, tanto do ponto de vista financeiro quanto operacional. Para a secagem de pastas, os problemas operacionais mais comuns são: aglomeração e acúmulo de material no leito, instabilidade,

elevada queda de pressão para iniciar a operação, além de dificuldades em projetar e operar equipamentos de grande escala (BARRET; FANE, 1990; BARROS et al., 2019; PABLOS et al., 2019; SOUZA; OLIVEIRA, 2005). Em relação aos custos, a maior desvantagem é a elevada demanda de ar necessária para manter o leito em regime estável, vazão essa muito maior do que o necessário para a própria secagem, reduzindo a eficiência energética (BRITO et al., 2018; KUDRA et al., 1989).

Em vista das dificuldades impostas por esse equipamento em algumas condições, uma nova pesquisa iniciou-se no Centro de Secagem em meados de 2013 (SOUSA, 2017) no intuito de aperfeiçoar o leito de jorro. A proposta baseou-se em inserir um agitador mecânico (parafuso helicoidal) no interior do leito de jorro cônico-cilíndrico (leito de jorro convencional), modificando-o para o leito de jorro mecânico. A ideia de inserir um agitador dentro do leito já havia sido proposta desde meados de 1977 (KUDRA et al., 1989; NÉMETH; PALLAI; ARADI, 1983; SZENTMARJAY; PALLAI, 1989), entretanto essa abordagem modificava a entrada de ar no leito de jorro convencional, ou seja, em vez de ser alimentado na parte inferior do leito, passou a ser lateral (alimentação de ar tangencial). Uma versão modificada foi desenvolvida no CS-DEQ, apresentando resultados satisfatórios em relação à secagem de pasta e à eficiência energética (BRITO et al., 2018; SOUSA, 2017). Nessa proposta, ao invés da alimentação tangencial voltou-se a alimentar o ar na parte inferior do leito, de forma que o mesmo sistema poderia operar com ou sem agitação, bastando para isso inserir ou não o parafuso helicoidal no interior do leito. Sendo assim, o leito de jorro mecânico conseguia preservar as principais vantagens do leito de jorro convencional e ainda eliminar, ou pelo menos minimizar, algumas de suas desvantagens. Além disso, a presença do agitador mecânico em processos de secagem pode contribuir com a quebra de aglomerados, evitando a aglomeração e acúmulo de produto no leito.

Apesar dos benefícios observados com a adição do parafuso helicoidal dentro do leito, nas operações com secagem de pasta, foram observados problemas operacionais em algumas condições. O principal problema observado foi a formação de zonas mortas próximas à parede cilíndrica do equipamento, causada principalmente pela aglomeração de partículas-produto e prejudicando a movimentação das partículas. Esse fato foi justificado devido ao diâmetro do cilindro do leito ser muito superior ao diâmetro do agitador. Esse resultado mostrou que o projeto e o tipo do agitador empregado também são importantes para aperfeiçoar operações com o leito de jorro mecânico.

Alguns estudos utilizando diferentes geometrias de agitadores já foram desenvolvidos com o intuito de melhorar a movimentação das partículas. Esses estudos observaram que a geometria do agitador afeta diversos parâmetros do processo em leito de partículas, como a curva fluidodinâmica, queda de pressão e a vazão de ar operacional, além da capacidade de secagem (REYES; VIDAL, 2000) e da curva da taxa de secagem (BAIT et al., 2011). Apesar desses resultados, alguns desses estudos foram realizados em leito fluidizado ou com geometria similar de agitador (agitador cônico).

Com a experiência do Centro de Secagem obtida com o leito de jorro mecânico e baseando-se nos estudos da literatura, acreditou-se que o efeito da geometria do agitador teria maior potencial nos processos com leitos de partículas agitados mecanicamente. Além dos efeitos provocados pela geometria do agitador mencionados anteriormente, acreditou-se que outras variáveis também poderiam ser afetadas, como o perfil de velocidade do ar, as propriedades das partículas, taxa de circulação das partículas, cinética de secagem, eficiência energética do processo, umidade e granulometria do produto final. Sendo que algumas dessas propriedades do processo não foram abordadas com esses agitadores. Dessa forma, o emprego de diferentes agitadores no leito de jorro convencional tem potencial para gerar novas configurações de equipamento que podem promover vantagens ainda não estudadas, possibilitando novas aplicações e ampliação das faixas operacionais.

De acordo com o estado da arte apresentado e observando as lacunas que ainda existem sobre o tema, o objetivo deste trabalho consistiu em modificar o leito de jorro convencional, adicionando diferentes configurações de agitadores mecânicos para melhorar a movimentação das partículas dentro do leito. Com essas modificações buscou-se minimizar a quantidade de ar necessária para realizar operações com esse equipamento, principalmente em processos que envolvem a secagem. Desta forma, pode ser possível otimizar e tornar o processo de secagem mais eficiente, reduzindo os custos operacionais, além de possibilitar outras aplicações do leito de jorro com agitador mecânico. Para atingir esses objetivos, foi necessária uma análise mais aprofundada das condições do processo, como os parâmetros fluidodinâmicos para operar o equipamento, comportamento das partículas no leito e sua interação com a fase fluida, bem como a movimentação das partículas, cinética de secagem, eficiência do processo, umidade e distribuição granulométrica do produto final.

## **CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A revisão bibliográfica deste trabalho foi baseada tanto em estudos anteriores já realizados no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, quanto em trabalhos encontrados na literatura. Nesse capítulo, foi feita inicialmente uma revisão global do leito de jorro com e sem agitação mecânica, principalmente sobre o comportamento fluidodinâmico para diferentes condições de estabilidade, além das limitações do equipamento em leitos secos. Posteriormente, foram apresentadas as modificações já existentes no leito de jorro convencional, identificando suas vantagens e desvantagens, dentre as quais destaca-se o equipamento com agitação mecânica. Logo em seguida foram abordadas as características dos leitos agitados mecanicamente e os principais estudos na área.

### **2.1 Leito de jorro**

O leito de jorro foi desenvolvido e patenteado em meados de 1954 pelo Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá por Mathur e Gishler (1955). A primeira versão desse equipamento foi destinada à secagem de grãos e sementes, onde um leito homogêneo com alta taxa de circulação das partículas possibilitava secar materiais termicamente sensíveis com elevadas vazões de ar (MATHUR; EPSTEIN, 1974; MATHUR; GISHLER, 1955).

A descoberta do leito de jorro ocorreu através de uma casualidade durante a utilização de um leito fluidizado, sendo esse último seu antecessor usado para a secagem de grãos. Desta forma, foi verificada a formação de um canal preferencial no centro do leito que lançava as partículas para o topo (região denominada de fonte). Após atingir a velocidade zero, as partículas retornavam na região chamada fonte e posteriormente deslizavam na lateral do leito (região do ânulo) e caíam novamente no centro. Esse movimento cíclico das partículas permitia que, ao utilizar-se o leito de jorro, altas taxas de transferência de calor e massa fossem obtidas (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

A primeira função do leito de jorro foi para operações que envolviam a secagem de sementes e grãos, entretanto as características desse equipamento possibilitaram sua aplicação em outras áreas, como revestimento de partículas, granulação, mistura de sólidos, reatores catalíticos, e pirólise, como alimentador de sólidos, e não menos importante, na secagem de pastas e soluções utilizada até hoje para uma grande variedade de produtos (DE MEDEIROS et al., 2021; FREIRE et al., 2012). Para essas aplicações, devem ser levadas em consideração as especificações de projeto e principalmente os



parâmetros fluidodinâmicos que são fundamentais para operar o equipamento de forma estável.

### 2.1.1 Comportamento fluidodinâmico

O funcionamento de um leito de jorro tem o mesmo princípio do fluidizado, entretanto ele opera com partículas maiores e trabalha acima da velocidade mínima de fluidização. O fluido utilizado normalmente é um gás, sendo que na prática é utilizado principalmente ar aquecido (CHRIST, 2006). O equipamento é constituído basicamente por uma coluna cilíndrica acoplada a uma base cônica, onde ar é inserido na parte inferior vertical do secador, através de uma única entrada reduzida em relação ao diâmetro do leito (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

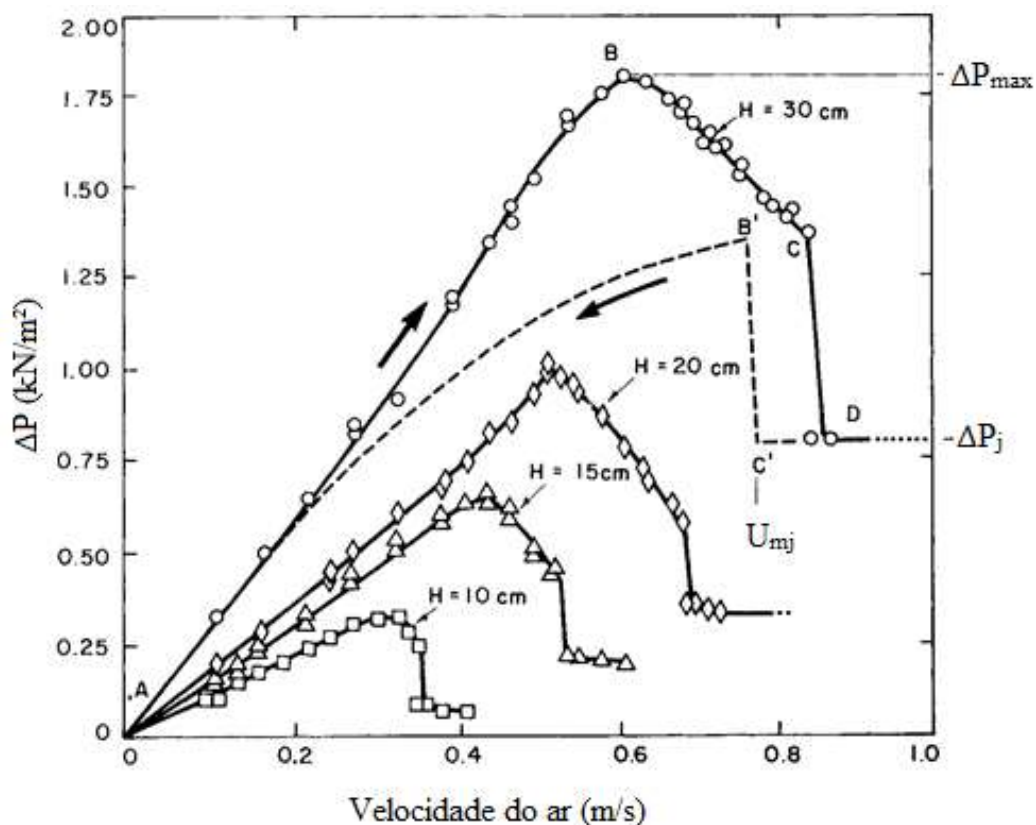
Nos secadores tipo leito de jorro, os parâmetros fluidodinâmicos de interesse para projeto e operação do equipamento são: velocidade mínima de jorro ( $U_{mj}$ ); queda de pressão máxima ( $\Delta P_{max}$ ); queda de pressão mínima para um jorro estável ( $\Delta P_j$ ) (MATHUR; EPSTEIN, 1974). Esses parâmetros precisam ser conhecidos para evitar o arraste das partículas para fora do leito, assegurar a formação de um jorro estável e para que não ocorra o colapso do jorro. Sendo esses parâmetros determinados a partir de uma curva característica do equipamento, como mostrado na Figura 2.1.

Na Figura 2.1 são mostrados os pontos de velocidade mínima de jorro, pressão máxima e mínima das partículas no leito. Com o início da entrada de ar no ponto A, o sistema comporta-se como um leito fixo. Posteriormente, com o aumento da vazão de ar, ocorre o aumento da pressão de forma quase linear até o ponto B (ponto de máxima pressão). O aumento constante da pressão se dá pelo aumento da resistência do leito ao escoamento do fluido, por haver a formação de um canal no centro e a compactação de partículas no topo. Quando esse canal se torna longo o suficiente, ocorre uma expansão do leito e a redução da pressão, até o ponto C. Com o aumento da vazão de ar ocorre uma brusca queda de pressão devido à desobstrução do canal (ponto D, que corresponde ao ponto de mínima pressão de um jorro estável). A partir desse ponto, o aumento da vazão de ar não influencia na queda de pressão, mas ocasiona a elevação da fonte e o transporte das partículas inertes caso a velocidade do ar seja muito alta (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

Após a formação do jorro e, se houver diminuição da velocidade do ar de entrada, a queda de pressão ficará constante, até que atinja a velocidade mínima de jorro (ponto

C'), onde se caracteriza a menor quantidade de movimento transferido pelo fluido, ou seja, a menor vazão de ar para se manter um jorro estável. Continuando com a redução da vazão de ar, ocorre um aumento da pressão, atingindo o ponto B', que indica o colapso ou término do jorro. Desta forma, no processo inverso (redução da vazão) o ponto de máxima pressão é menor que a máxima pressão com inserção de ar, sendo atrelado ao fato que não há mais a necessidade de energia extra para empurrar as partículas e ocorrer a formação do jorro. Depois do ponto B', a redução da pressão diminui gradualmente de acordo com a redução da vazão de ar.

Figura 2.1 - Curva característica do leito de jorro cônico-cilíndrico.



Fonte: Adaptado de Mathur e Epstein (1974).

Como apresentado na Figura 2.1, o comportamento fluidodinâmico também depende da altura do leito de partículas. Entretanto existe uma altura máxima do leito no qual o leito torna-se instável e perde uma das principais vantagens do leito de jorro. Assim como a altura do leito, outros parâmetros também podem afetar a estabilidade do leito e comprometer os processos em leito de jorro.

## 2.1.2 Condições operacionais e estabilidade do leito

Apesar das características promissoras do leito de jorro, ainda existem algumas desvantagens, principalmente em relação à estabilidade do leito. Um dos principais fatores que afetam a estabilidade são a geometria do leito, a vazão de ar e as propriedades do sólido e do fluido.

- Geometria do leito

Em relação a geometria do leito, a razão dos diâmetros do equipamento, ângulo do cone e diâmetro do orifício de entrada são os principais parâmetros de interesse que podem afetar a estabilidade do leito.

Para colunas cilíndricas, Becker (1961) sugere um valor crítico para a razão entre diâmetro do orifício e diâmetro da coluna  $D_i/D_c = 0,35$ . Do mesmo modo, Mathur e Epstein (1974) propõem um valor limite de  $D_i/D_c = 0,30$  e sugerem um valor para  $D_i/d_p$  entre 40 e 50. Essa relação também afeta outro parâmetro limitante do leito de jorro, a altura máxima do leito. Alguns estudos já demonstraram que a altura máxima do leito reduz com o aumento do diâmetro do orifício de entrada do ar ( $D_i$ ). Outros estudos já observaram que o leito de partículas se torna mais estável com a redução do orifício de entrada do ar, mas uma redução demasiada pode causar problemas com a queda de pressão no leito (ADEODATO, 2003). Em muitos casos para melhorar a estabilidade do leito é adicionado na entrada do ar um bocal tipo Venturi. O ângulo do cone é outro fator importante, o qual facilita o escoamento de sólidos com uma menor seção cônica, mas a faixa recomendada fica entre  $40^\circ$  e  $60^\circ$  (ADEODATO, 2003; MATHUR; EPSTEIN, 1974). Outros estudos com fluidodinâmica computacional (CFD) têm sido desenvolvidos para compreender melhor os efeitos do ângulo do cone nos fenômenos de transferência no leito (SOUZA, 2019).

- Efeito das propriedades das partículas

Através do Diagrama de Geldart, é possível identificar que existe uma faixa de diâmetro e densidade das partículas que são recomendadas para operar com o leito de jorro. Fora dessa faixa podem ocorrer instabilidades e problemas operacionais. De qualquer forma, o diâmetro mínimo para operação em leito de jorro é em torno de 1 mm, entretanto alguns estudos indicam que podem ser utilizados diâmetro inferior contanto

que ocorra modificação no projeto do equipamento, onde o diâmetro do orifício de entrada não ultrapasse 30 vezes o diâmetro da partícula (GHOSH, 1965).

Apesar de existir uma faixa específica para uso do diâmetro médio das partículas, ocorre uma piora na estabilidade do leito para uma menor uniformidade do tamanho das partículas, ou seja, partículas desuniformes prejudicam a estabilidade do leito. Além disso, existe também o efeito da geometria das partículas no comportamento do leito (ADEODATO, 2003).

- Efeito da vazão de ar

A vazão de ar é um parâmetro essencial para estabilidade do leito, sendo que valores inferiores à velocidade de mínimo jorro ocasionam o colapso deste e a interrupção do processo. Quando empregada maiores altura do leito, somente o aumento da vazão de ar não garante a continuidade do jorro, podendo muitas vezes formar fenômenos de instabilidade, como o leito borbulhante.

Normalmente, a vazão de ar é indicada pelo parâmetro da velocidade de ar, na qual pode ser relacionada com as demais variáveis do processo, como geometria do equipamento, diâmetro da partícula e queda de pressão. Além do mais, na literatura são apresentadas diversas correlações empíricas, e suas respectivas faixas de validade (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

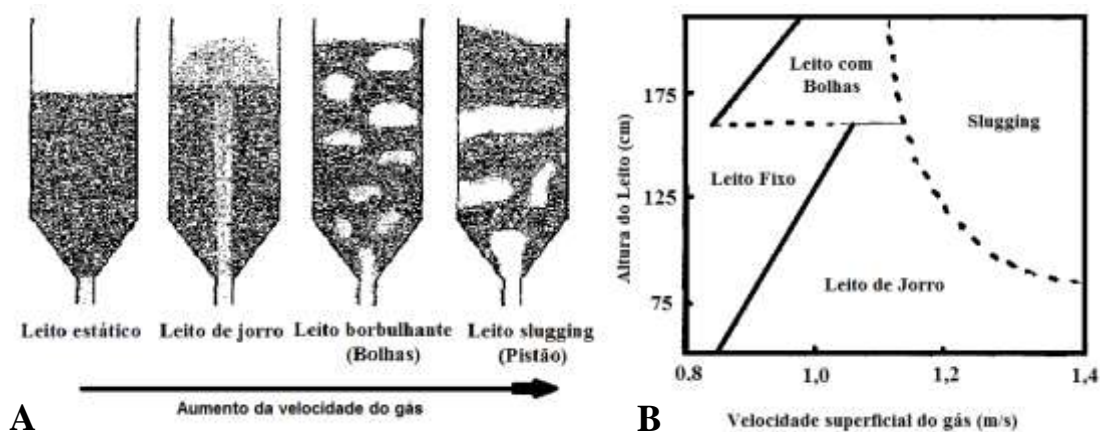
Apesar da influência da geometria e das propriedades das partículas sobre a estabilidade do leito, em muitos casos não é possível realizar sua modificação para alterar e/ou melhorar as condições operacionais. Desta forma, somente a vazão de ar é um parâmetro facilmente ajustável durante as operações em leito de jorro, mas seus efeitos podem alterar o comportamento das partículas do leito, como os “regimes de jorros”.

### **2.1.3 Regime do jorro**

O regime do jorro está diretamente relacionado com a sua estabilidade, sendo que ele pode variar devido à velocidade do ar, propriedades das partículas e do ar (classificação do diagrama de Gerldart), das configurações geométricas do equipamento (ADEODATO, 2003; SANTANA, 2011) e principalmente da altura do leito (MATHUR; EPSTEIN, 1974). Quando algum desses parâmetros é alterado ou quando são alcançados os limites máximos ou mínimos, é possível que surjam alterações nos regimes de jorro.

Existem diagramas específicos para prever a estabilidade em função dos regimes de jorro baseando na velocidade do ar e na altura do leito de partículas, como pode ser observado na Figura 2.2. Em condições onde o equipamento é operado com altura elevada do leito pode ser favorecida a formação do fenômeno conhecido como “slugging” ou atingir o leito borbulhante, sendo que estes dificultam o processo e geram instabilidade no leito.

**Figura 2.2** – Transição de fase (A) e diagrama de regime (B) em função do aumento da velocidade do fluido.



Fonte: Adaptado de Mathur e Epstein (1974).

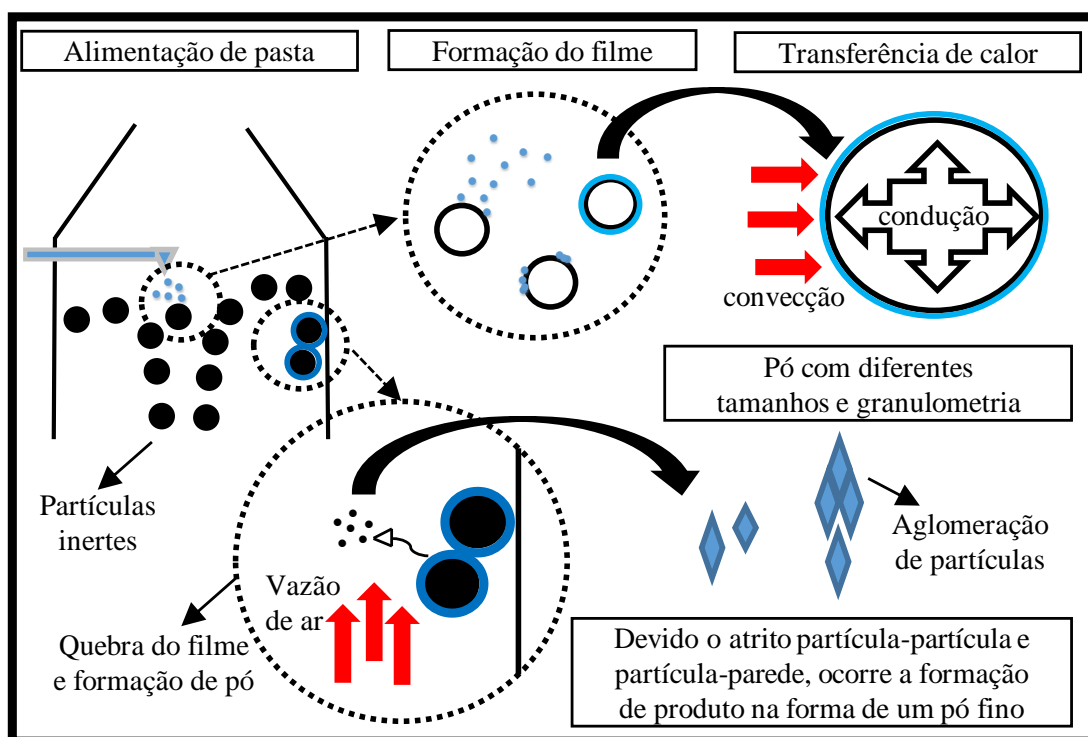
#### 2.1.4 Secagem de pastas e soluções

Os principais materiais processados pelo processo de secagem em leito de jorro são as pastas alimentícias (polpas de frutas tropicas, leite e ovo homogeneizado), produtos químicos inorgânicos (suspensões ou soluções de  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{NaCl}$ ), produtos farmacêuticos (extratos vegetais e licor preto) e outros subprodutos (sangue animal, lodo de esgoto e efluente industrial de amido) (FREIRE et al., 2012).

O processo de secagem consiste na redução do teor de umidade da pasta/solução devido à transferência de água de uma fase líquida (pasta/solução) para a fase gasosa (normalmente ar). Para que ocorra a evaporação de forma eficiente, necessita-se de uma maior área de troca térmica (área de secagem). No leito de jorro, são utilizadas partículas inertes (normalmente vidro e polietileno) para aumentar significativamente a área de contato entre as fases. Estudo realizado por Marreto et al. (2009) demonstrou que a taxa de evaporação de água por unidade de volume do secador em um leito de jorro é maior do que o *spray-dryer*.

Na Figura 2.3 são esquematizadas as etapas do processo de secagem de pasta em leito de jorro, mostrando também como ocorre a aglomeração e acúmulo de produto no leito. Sendo assim, a pasta é inicialmente dispersa sobre as partículas inertes na forma de gotejamento ou por atomização, liberando pequenas partículas de pasta. Essa etapa também pode ocorrer na base do leito, mas alguns estudos já apontaram que quando alimentado nessa região aumenta o acúmulo de material no leito (SOUZA; OLIVEIRA, 2005).

**Figura 2.3** - Processo de formação e aglomeração de produto no leito de jorro.



A pasta alimentada no leito se adere à superfície das partículas inertes formando um filme fino líquido e através da transferência de calor ocorre a evaporação da água e assim a secagem do filme. Tanto a condução que ocorre pelas partículas inertes pré-aquecidas quanto a convecção promovida pela fase fluida auxiliam simultaneamente nessa etapa, entretanto a condução ocorre predominantemente na fase inicial da secagem (regime transiente).

Após a evaporação de água no filme, ocorre a sua solidificação e assim algumas mudanças nas propriedades reológicas desse filme. Nessa etapa estão presentes as transferências de calor e massa simultaneamente. Devido à intensa movimentação dentro do leito, ocorre atrito entre as partículas inertes e entre essas com a parede do cilindro,

transformando o filme sólido em um pó fino. Esse pó formado é arrastado pela corrente de gás até o ciclone, onde ocorre a separação da fase sólida da gasosa. Entretanto, uma pequena fração das partículas do pó é arrastada pelo gás (pó elutriado), saindo na parte superior do ciclone. Estudo realizado por Barros et al. (2019) apontou que entre 2 a 8% da massa alimentada no leito pode ser elutriada, dependendo das condições operacionais.

As partículas do pó formadas no leito de jorro podem variar de acordo com as condições do processo e com as propriedades do produto a ser seco, apresentando dessa forma geometria variada, mas normalmente são na forma de flocos irregulares e finos (MARKOWSKI, 1992), sem porosidade interna (MARKOWSKI; KAMINSKI, 1983). O tamanho pode apresentar diâmetro médio inferior a  $1,0 \times 10^{-4}$  m (STRUMILLO, MARKOWSKI; KAMINSKI, 1983; ALMEIDA, 2009). Esse pó gerado possui granulometria variada, mas estudo realizado por Barros et al. (2019) identificaram que as partículas do produto ficaram entre 6 e 13  $\mu\text{m}$ , enquanto as partículas acumuladas no leito apresentaram diâmetro médio superior entre 5 e 17  $\mu\text{m}$ . Outra observação importante verificada por esses autores, foi que o diâmetro do material dissolvido para alimentar o leito inicialmente ( $2,12 \pm 0,04$   $\mu\text{m}$ ) era significativamente menor do que o diâmetro encontrado após o processo de secagem. Esse aumento no tamanho da partícula, pode ser justificado devido a uma mudança nas propriedades reológicas do filme ocorridas durante a etapa de secagem (transformação do filme líquido em um filme sólido) e também pela formação do pó devido o atrito interno que afeta a granulometria do produto final.

O processo de aglomeração que ocorre no leito de jorro é afetado principalmente pela alta vazão de pasta ou a menor capacidade de secagem pela combinação da temperatura e vazão de ar. Alguns estudos já relataram as dificuldades causadas pela aglomeração e acúmulo de material no leito. Barros et al. (2019) verificaram que o acúmulo de massa dentro do leito pode ficar entre 23 a 34% do material alimentado. Schneider e Bridgwater (1989) concluíram que umidade relativa do ar em torno de 80% pode tornar o jorro instável, reduzindo a movimentação das partículas e podendo causar o colapso do jorro.

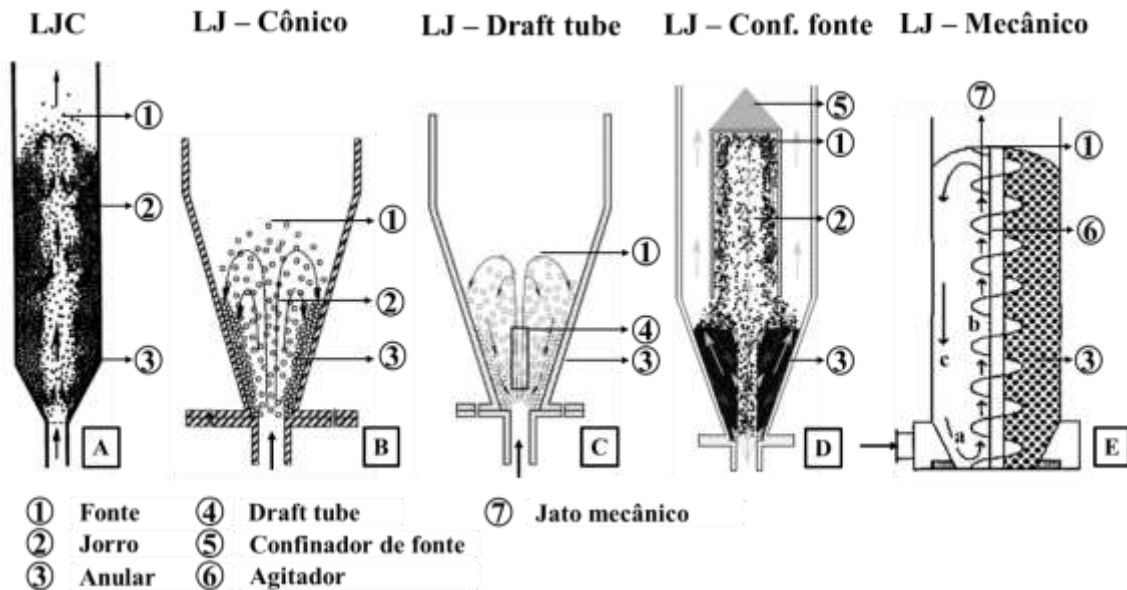
Além dos problemas mencionados de aglomeração e acúmulo de produto no leito, ainda existem algumas dificuldades que podem tornar o leito de jorro inviável em determinadas aplicações. Desta forma, existem três principais fatores que prejudicam a utilização do leito de jorro, como a aglomeração e acúmulo de pasta, o custo de operação devido a maior vazão de ar e os problemas de estabilidade na ampliação de escala. Em

vista desses fatores, alguns autores sugeriram modificações estruturais no leito de jorro para tentar melhorar a operacionalidade e reduzir os custos com a vazão de ar.

## 2.2 Leito de jorro modificado

Existem diferentes estratégias de projeto para os leitos de jorro com o intuito de superar as limitações do equipamento convencional. As principais são a geometria cônica (leito de jorro cônico), o uso de dispositivos internos (*draft tube* e confinadores de fonte) e a inserção de agitadores mecânicos (leito de jorro mecânico). Essas diferentes configurações são apresentadas na Figura 2.4.

**Figura 2.4** - Leito de jorro convencional e suas respectivas modificações. Legenda: Leito de jorro: (A) convencional; (B) cônico; (C) draft tube; (D) com confinador de fonte; (E) mecânico.



Fonte: Adaptado de Markowski e Kaminski (1983); Olazar et al. (1999); Szentmarjay, Pallai e Regényi, (1996); Tellabide et al. (2020).

Todas as modificações mostradas na Figura 2.4 possuem uma base cônica, a qual é utilizada em todas as versões com o objetivo de aumentar o movimento de sólidos e eliminar espaços mortos no fundo do leito. A geometria cônica (LJ – Cônico) proporciona uma operação estável em uma ampla faixa de vazões de gás (Olazar *et al.*, 1992, 1999). Sua operação estável é obtida entre dois regimes, leito de jorro e o leito de jato, correspondendo a dois níveis distintos de velocidade do fluido (OLAZAR et al., 1992, 1999; SAN JOSÉ et al., 1993).



O uso do “draft tube” melhora o desempenho do leito de jorro, diminuindo a velocidade mínima de jorro e a queda de pressão operacional necessária para condições estáveis (ALTZIBAR et al., 2013; ESTIATI et al., 2019). A utilização do confinador de fontes estabiliza o sistema e permite operar com partículas finas mesmo sem nenhum tipo de tubo dentro do leito, além de reduzir o tempo de secagem (ESTIATI et al., 2019). O uso do confinador de fontes permite atingir regimes de operação altamente estáveis, ampliando a faixa operacional para 4 vezes a de leitos de jorro simples e aumentando a razão entre o diâmetro de entrada e o diâmetro de partícula de 20-30 para 1000 (TELLABIDE et al., 2020).

Apesar do leito de jorro cônico, com tubo draft e com confinador de fonte apresentarem melhorias em comparação com o equipamento convencional, todos ainda dependem exclusivamente da vazão de ar para movimentar as partículas, através da força de arraste. Esse fator indica que mesmo com uma redução da vazão de ar em algumas versões a eficiência energética ainda pode ser comprometida, além da ampliação de escala, uma vez que a altura do leito estático pode ser um fator limitante. Desta forma, a versão com a inserção do agitador mecânico (LJ – Mecânico) dentro do leito elimina ou reduz significativamente as desvantagens do leito de jorro convencional, como apresentado na Figura 2.4 – E.

### **2.3 Leito de jorro mecânico**

A utilização do agitador mecânico dentro do leito de jorro foi proposta em meados de 1976 por um grupo de pesquisadores do Instituto de Pesquisa da Hungria, composto por Aradi, Pallai, Blickle, Monostori, Németh e Varga, mas a patente foi oficializada em 1977 (Hung. Pat., 4.203.228/1977 U.S.P.) (KUDRA et al., 1989). A diferença primordial entre o leito de jorro convencional é a adição de um parafuso helicoidal instalado ao longo do eixo vertical do leito de jorro, como apresentado na Figura 2.4 - E.

Com a adição do agitador, permaneceram as vantagens do leito de jorro convencional, entretanto algumas desvantagens foram reduzidas e/ou sanadas. Com exceção do mecanismo que garante a circulação de sólidos (jato mecânico e jorro), tanto o leito de jorro convencional quanto o mecânico compartilham o mesmo tipo de contato entre a fase sólida e a fase gasosa. Nesse tipo de equipamento, o movimento das partículas não é mais exclusivamente através da passagem de ar pelo leito, promovendo a formação da região do jorro e da fonte. Com a modificação para leito de jorro mecânico, o

movimento é induzido pela ação conjunta e simultânea envolvendo a rotação do parafuso e a vazão de ar, formando um fenômeno conhecido como “jato mecânico”. Desta forma, as partículas são transportadas pelo parafuso até o topo, formando uma camada deslizante densa (representado pela letra b na Figura 2.4). Posteriormente, essas partículas caem e escoam por gravidade (em contra-corrente com a vazão de ar, letra c) até a base do leito, onde o sentido de escoamento muda novamente, sendo representado pela letra a. Essa última, refere-se ao fundo cônico do leito onde ocorre a maior taxa de circulação das partículas, promovendo o processo de secagem a uma taxa constante, com um tempo curto (SOUSA et al., 2019; SZENTMARJAY; PALLAI; REGÉNYI, 1996; SZENTMARJAY; PALLAI; TÓTH, 2011).

Devido ao movimento característico do jato mecânico, a velocidade de escoamento das partículas é independente da vazão de ar. Desta forma, uma velocidade do ar ideal pode ser escolhida para secagem, podendo-se ajustá-la para atingir a melhor faixa de operação (SZENTMARIAY; PALLAI; SZALAY, 1995; SZENTMARJAY; PALLAI; REGÉNYI, 1996). Sendo assim, a redução da vazão de ar proporciona uma maior eficiência energética, além de outras vantagens como redução dos picos de pressão e melhor estabilidade no leito, uma vez que não há colapso do leito como no convencional (BRITO et al., 2018; NÉMETH; PALLAI; ARADI, 1983; REYES; VIDAL, 2000).

Diferente do leito de jorro convencional, a entrada de ar no leito de jorro mecânico foi inicialmente feita na base de forma tangencial (NÉMETH; PALLAI; ARADI, 1983; SZENTMARJAY; PALLAI, 1989; SZENTMARJAY; PALLAI; REGÉNYI, 1996). Contudo, alguns autores propuseram alterações nesta configuração, utilizando a alimentação de ar na parte inferior do equipamento, na ascendente (SOUSA et al., 2019). Nessa nova versão foram obtidos bons resultados, onde a agitação mecânica foi comprovadamente mais eficaz na secagem de suspensões líquidas de carbonato de cálcio diluídas e partículas grandes de alumina porosa a uma velocidade do ar aproximadamente 50% menor em comparação com a secagem em um leito de jorro convencional. Entretanto, o leito de jorro convencional apresentou melhor desempenho na secagem de leite desnatado líquido, sendo justificado devido ao processo de aglomeração que ocorreu próximo a parede do equipamento na configuração com agitação mecânica, fato este devido as maiores forças de interação provocadas por pastas mais complexas. De modo geral, a inserção do parafuso helicoidal no leito possibilitou que o processo de secagem fosse realizado em condições estáveis. O uso da agitação mecânica com parafuso

helicoidal também possibilitou ampliar a faixa operacional quando comparado com um leito de jorro convencional (BRITO et al., 2018; SOUSA, 2017; SOUSA et al., 2019).

Apesar dessa nova modificação apresentar bons resultados em comparação com o convencional, foi observado na secagem de pasta que ainda ocorriam problemas operacionais como aglomeração e acúmulo de produto no leito. Sousa (2017) observou que em condições de maior vazão de pasta e menor temperatura, ocorreu a formação de zonas mortas ao redor do leito. Com exceção do centro do leito onde o agitador mecânico estava presente, todo o leito de partículas formou uma crosta pegajosa, onde não ocorria mais a movimentação das partículas. Esse resultado indesejável também pode ser justificado pelo diâmetro do parafuso ser muito menor do que o diâmetro do cilindro. Tal problema poderia ser evitado utilizando outra configuração de agitador, mais próximo da parede do leito, evitando a formação de aglomerados. Outros autores utilizaram versões modificadas, ou alterações no processo para estudar o comportamento do leito com a adição do agitador mecânico, bem como a ampliação de escala para esse novo tipo de equipamento. A seguir segue uma lista dos principais estudos com leitos mecanicamente agitados.

## **2.4 Principais estudos com leito de jorro mecânico**

Na literatura alguns estudos apontam as vantagens do leito de jorro mecânico frente ao leito de jorro convencional. Na Tabela 2.1 são apresentados os principais trabalhos na área, indicando o tipo de agitador e a entrada de ar utilizada em cada estudo. Nesses trabalhos foram empregados diversos tipos de materiais para secagem, como grãos, vegetais (cenouras, batatas e cebolas), pastas e soluções inorgânicas como carbonato de cobalto, zinco,  $\text{CaCO}_3$ , solução de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  e óxido de zinco. Dentre os produtos para fins alimentícios, se destacam o concentrado de tomate, mistura de carboidratos, polpa de batata, soluções com proteína e leite, sendo aplicado também para secagem plasma sanguíneo e fermento de cervejaria. Estas pastas apresentam elevado teor de umidade e/ou composição química variada, o que dificulta a secagem e pode gerar problemas operacionais, entretanto a adição do agitador mecânico ao leito auxilia na redução desses problemas.

Analisando-se a Tabela 2.1 é possível verificar que vários estudos utilizam o parafuso helicoidal, promovendo a movimentação das partículas do leito

predominantemente no centro, onde ocorreria a região da fonte no leito de jorro convencional.

Apesar dessa característica, em alguns casos a movimentação das partículas próximo à parede do cilindro pode ser comprometida, ocorrendo a formação de “zonas mortas” e aglomerados. Desta forma, pode-se também utilizar agitadores em formato cônico ou pás (na forma de uma cruz). Contudo, poucos são os estudos com o agitador na forma de “cruz” e nenhum estudo foi encontrado para o leito de jorro, principalmente em relação à análise das características desse agitador, como inclinação, quantidade de pás, velocidade de rotação e propriedades das partículas, além do comportamento fluidodinâmico e do perfil de velocidade do ar. Essas variáveis podem auxiliar no melhor entendimento da aplicação dos leitos agitados, possibilitando fazer uma melhoria no processo.

**Tabela 2.1** – Pesquisas envolvendo leito de jorro com agitadores mecânicos.

<b>Referência</b>	<b>Agitador mecânico</b>	<b>Entrada de ar</b>
Németh et al., 1983	Parafuso helicoidal	Tangencial ao leito
Péter-Horányi et al., 1985	Parafuso helicoidal	Tangencial ao leito
Szentmaria e Pallai, 1989	Parafuso helicoidal	Tangencial ao leito
Kudra et al., 1989	Parafuso helicoidal	Tangencial ao leito
Szentmariay et al., 1992	Parafuso helicoidal	Tangencial ao leito
Szentmariay; Szalay; Pallai, 1994	Parafuso helicoidal	Tangencial ao leito
Szentmariay; Pallai; Szalay, 1995	Parafuso helicoidal	Tangencial ao leito
Szentmaria; Pallai; Regényi, 1996	Parafuso helicoidal	Tangencial ao leito
Reyes e Vidal, 2000	Agitador cônico (▼)	Ascendente
Reyes; Szentmaria e Szijártó, 2001	Agitador cônico	Ascendente
Pallai; Szentmaria; Szijártó, 2001	Parafuso helicoidal	Tangencial ao leito
Szalay; Pallai; Szentmaria, 2001	Parafuso helicoidal	Tangencial ao leito
Kutsakova, 2004	Cone invertido	Tangencial ao leito
Kutsakova, 2007	Cone invertido (▲)	Tangencial ao leito
Pallai-Varsányi; Tóth; Gyenis, 2007	Parafuso helicoidal	Tangencial ao leito
Sousa et al., 2018	Parafuso helicoidal	Ascendente
Brito et al., 2018	Parafuso helicoidal	Ascendente

## CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo são apresentados os materiais utilizados e os métodos empregados para o desenvolvimento da pesquisa, assim como as equações e alguns trabalhos que foram usados como referência. Todos os experimentos foram desenvolvidos no laboratório do Centro de Secagem de Pastas, Sementes e Suspensões, localizado no Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

### 3.1 Unidade experimental

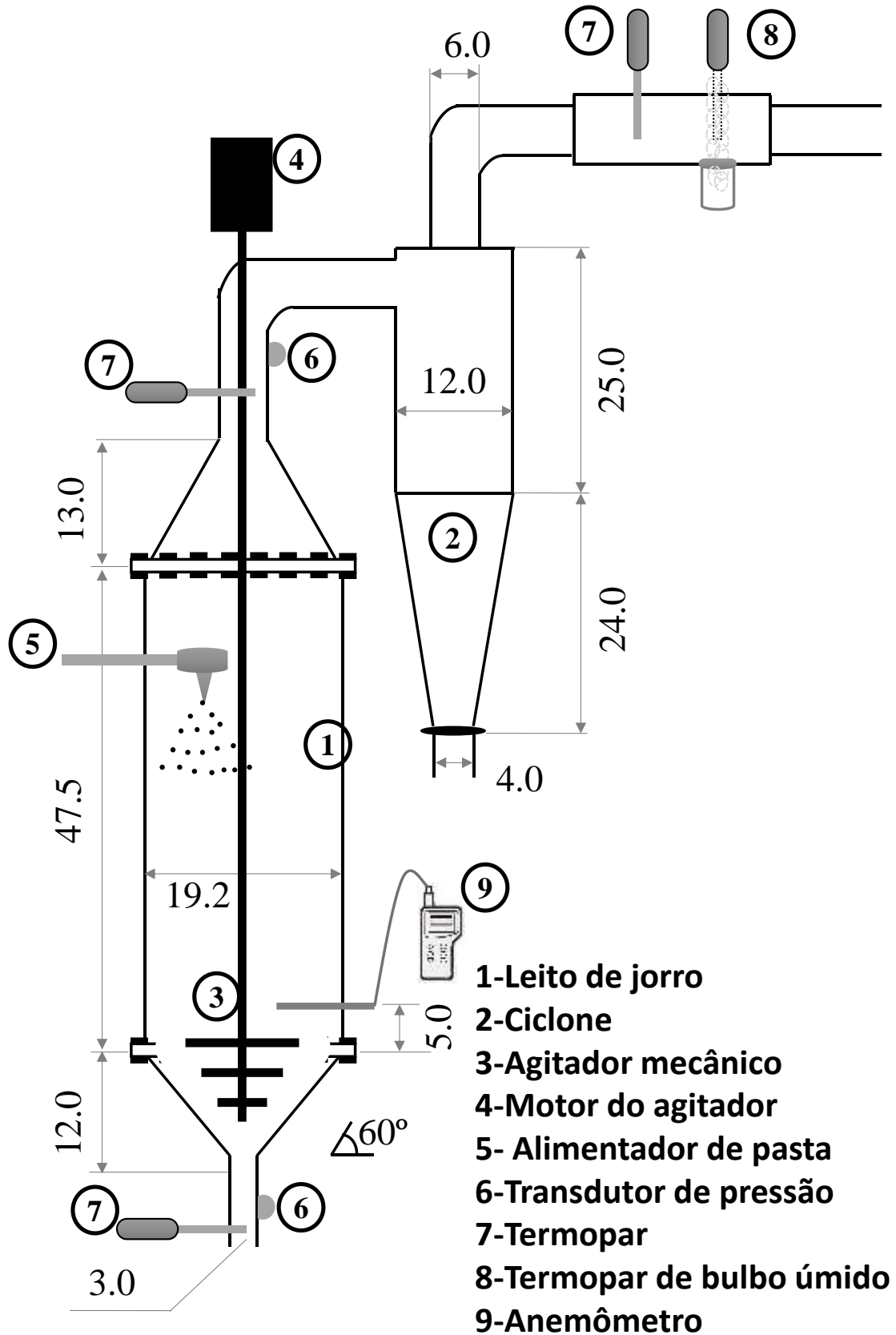
Os experimentos foram realizados em um leito de jorro cônico-cilíndrico (CSB) de aço inoxidável com ângulo externo de 60°. Posteriormente, o agitador foi inserido no equipamento convencional, modificando-o para leito de jorro com agitador mecânico (LJAM). A unidade experimental utilizada para realizar os ensaios fluidodinâmicos é apresentada na Figura 3.1.

O fornecimento de ar foi proveniente de um soprador de 7,5 HP de potência, sendo sua corrente controlada pelo inversor de frequência, mas também existem duas válvulas tipo gaveta para o controle manual da vazão de ar formando um sistema *by-pass*. A vazão de ar da linha era determinada por um medidor de vazão (tipo placa de orifício) que utilizava a equação de calibração pré-ajustada. A equação relaciona a diferença de pressão entre dois pontos da placa com a vazão de ar, sendo proposta por Corrêa (2000). As medidas de pressão da placa de orifício e do leito (item 6 – Figura 3.1) foram realizadas usando transdutores de pressão e foram verificadas com medidor padrão tubo em U. Além disso, todos os termopares foram calibrados através de um poço de calibração marca Block Calibrator DB-35L (Temperatura de referência de 70°C como padrão), onde o erro médio não ultrapassou 2%.

Um anemômetro de fio quente (AKSD-AK833) foi inserido em uma seção transversal 0,05 m acima da base da coluna cilíndrica para medir a velocidade do ar em função do raio nessa posição z, como é indicado pelo item 9 da Figura 3.1. As medições foram realizadas em várias posições radiais e angulares por 10 s e em triplicata a uma taxa de amostragem de 1.25 Hz. Durante todo o período de medição, a temperatura do ar permaneceu em  $29,7 \pm 0,8^\circ\text{C}$ .

**Figura 3.1** – Diagrama esquemático da unidade experimental usada nos experimentos fluidodinâmicos.

Dimensões em centímetros.



Todos os sistemas de medidas (temperatura, queda de pressão e vazão de ar) estão conectados ao módulo condicionador de sinais (Lynx), constituído por três módulos (NI 9213, NI 9205 e NI 9265). Esses módulos enviam sinais para a placa de aquisição de dados e este encaminha para um microcomputador que possui o software LabVIEW 2011. Esse software permite acesso à placa que realiza a interface entre o processo e o hardware, assim é possível captar e converter sinais digitais em analógicos, podendo realizar o tratamento dos dados para obter informações importantes do processo.

Para a etapa de secagem de pasta e suspensões, foi utilizado um alimentador e atomizador de pasta como demonstrado no item 5 da Figura 3.1. O sistema de mistura do líquido e ar comprimido (atomizador de duplo fluido) é realizado em uma câmara de mistura, sendo posteriormente atomizado a uma pressão de 3 psi empregada por um compressor de ar (Gast - 0523-V4-6180CX). Para a alimentação do leite, foi utilizado um agitador (Fisatom-713) para que não ocorresse a precipitação da suspensão e assim a concentração da alimentação fosse constante. O esquema detalhado desse processo pode ser encontrado em estudos anteriores de Barros (2018) ou Silva (2016).

Para determinar a umidade relativa, foram medidas as temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco, juntamente com manipulações matemáticas das equações psicrométricas para encontrar uma correlação que possa ser utilizada para o monitoramento das umidades de saída do sistema de secagem. Foi utilizado como referência o artigo desenvolvido por Wilhelm (1976), os trabalhos de Silva (2016) e Almeida (2009). Os detalhes do cálculo da umidade relativa podem ser encontrados em estudos anteriores (BARROS, 2018).

Após determinar a umidade relativa em função do tempo ( $UR_t$ ), foi descontado a umidade relativa inicial ( $UR_{t=0}$ ) Para a queda de pressão, foi utilizado o adimensional, sendo dividido pela queda de pressão no início do processo ( $\Delta P_{t=0}$ ).

Detalhes adicionais da unidade experimental, aquisição de dados, procedimentos experimentais e armazenamento de dados podem ser encontrados em estudos anteriores (ALMEIDA, 2009; BARROS, 2018; SILVA, 2016; VIEIRA, 2015).

### **3.2 Projeto dos agitadores mecânicos**

Para esse estudo, foram analisadas três diferentes configurações de agitadores: agitador com formato de pás-retas, agitador com formato de pás-inclinadas e o parafuso helicoidal. Os agitadores no formato de pás, foram projetados para que as pás ficassem o

mais próximo possível da parede do equipamento, no intuito de “raspar” a lateral interna do leito. Para isso, foi utilizado como referência o estudo da literatura que utilizou um agitador cônico (REYES; VIDAL, 2000).

Com base nos agitadores mecânicos propostos por Reyes e Vidal (2000) e Reyes, Diaz e Marquardt (2001), um agitador de ferro fundido foi projetado com três conjuntos de pás-retas (lâminas retas) soldados na forma de cruz, conforme apresentado na Figura 3.2. As dimensões das pás foram definidas com base em uma relação adimensional entre o diâmetro do bocal de entrada ( $D_0$ ) e o diâmetro inferior da lâmina ( $d_s$ ), adotando um valor de cerca de 0,3, e entre o diâmetro da coluna ( $D_c$ ) e o diâmetro da lâmina superior ( $D_s$ ), adotando um valor de cerca de 1,4. Tais valores foram adotados para manter as pás dos agitadores o mais próximo possível da parede em toda região cônica, visando melhorar a agitação no leito. Os adimensionais utilizados, fazem referência ao estudo propostos por Reyes e Vidal (2000). A lâmina intermediária foi projetada com base no valor médio entre as lâminas superior e inferior. Detalhes podem ser observados na Figura 3.3-A para o agitador de pás-retas. Um distribuidor de ar perfurado foi colocado na parte inferior para permitir o fluxo de ar e apoiar o agitador, o que garante a estabilidade do sistema conforme observado em estudos preliminares. Este distribuidor foi utilizado apenas para os experimentos com o agitador mecânico.

Para o agitador de pás-inclinadas foram utilizados a mesmas configurações do agitador de pás-retas, alterando-se apenas a inclinação das pás para  $45^\circ$ , como pode ser observado na Figura 3.3-B. No intuito de alterar a distância entre as pás em estudos posteriores, tanto o agitador de pás-retas quanto de pás-inclinadas foram construídos de tal maneira que fosse possível alterar a distância e o número de pás na haste. Essa modificação foi feita através de um parafuso adicionado na lateral das pás, como pode ser observado na Figura 3.3. Essa modificação permite que tanto sejam retirados ou acrescentados novos conjuntos de lâminas, ou que se aumente o espaçamento entre estas. Isso possibilita que a altura do leito agitado diretamente pelo contato com as pás e as partículas aumente, podendo melhorar a movimentação dentro do leito.

O agitador de parafuso helicoidal utilizado é mostrado na Figura 3.4, sendo o mesmo modelo do estudo de Sousa (2017). O projeto do parafuso helicoidal foi baseado em estudos da literatura com base no diâmetro do bocal de entrada (SZENTMARJAY; PALLAI, 1989). Nesse agitador, o parafuso foi colocado em todo o comprimento da haste, sendo assim o agitador de parafuso helicoidal ocupava desde a base do distribuidor de ar até a altura máxima do leito de partículas, para todos os ensaios.



Figura 3.2 – Dimensões dos agitadores de pás-retas. Medidas em centímetros.

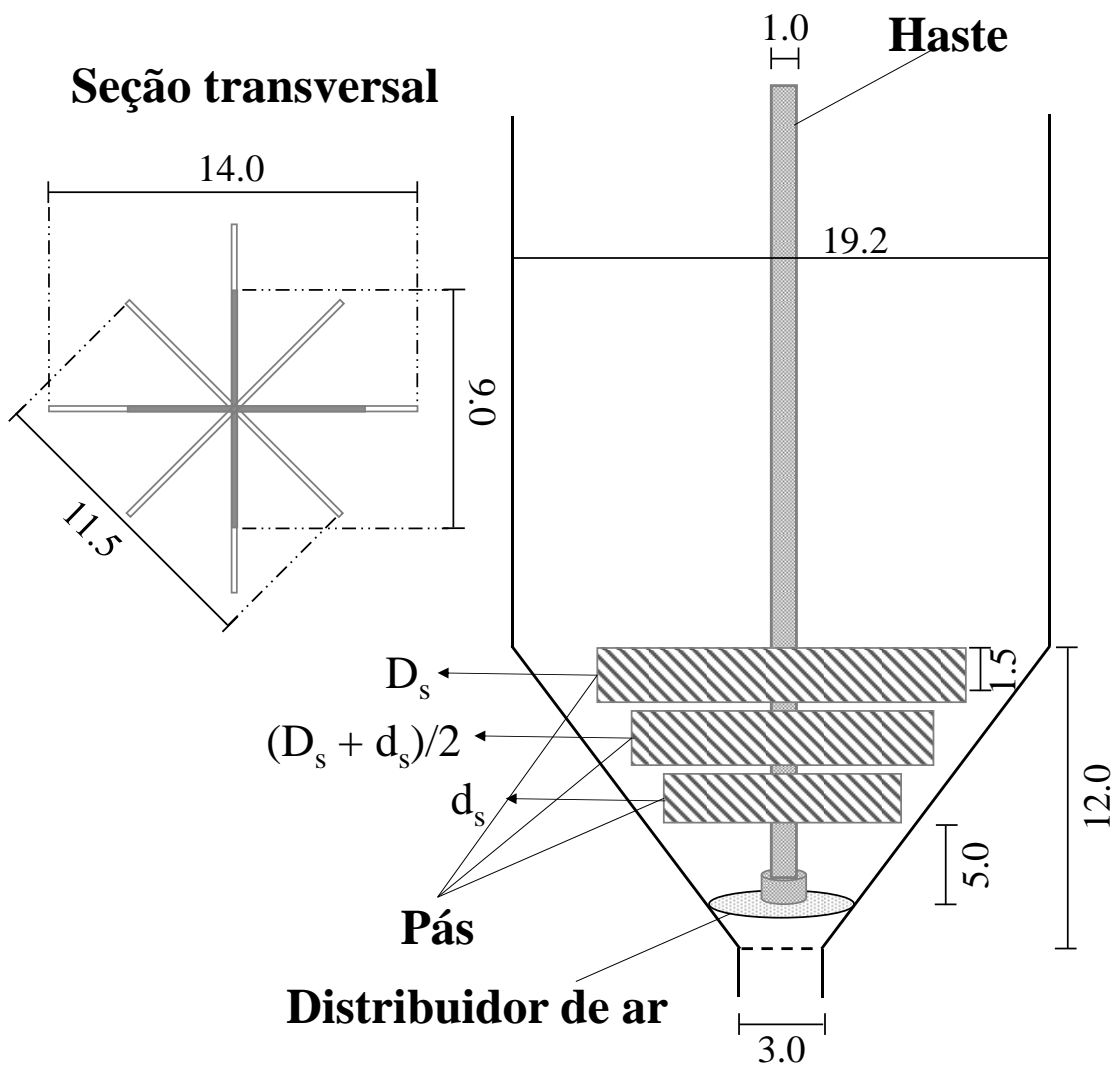
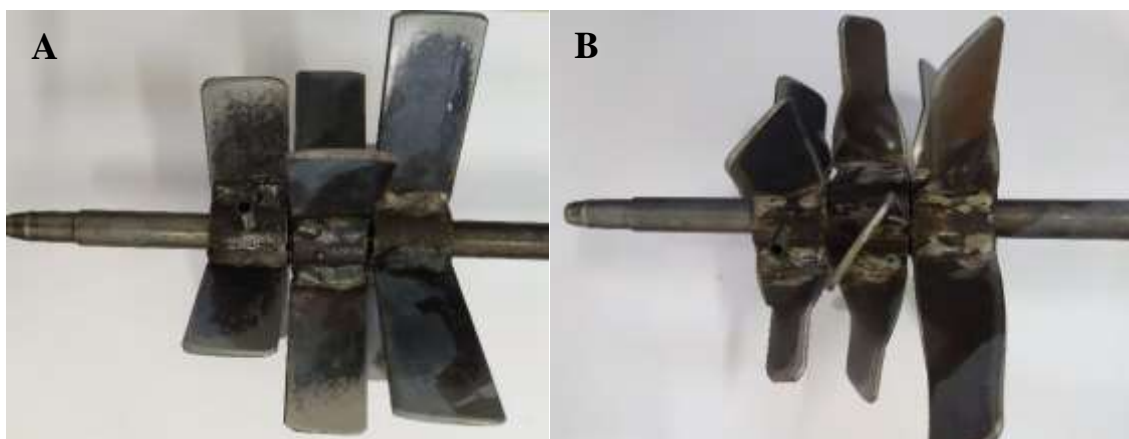
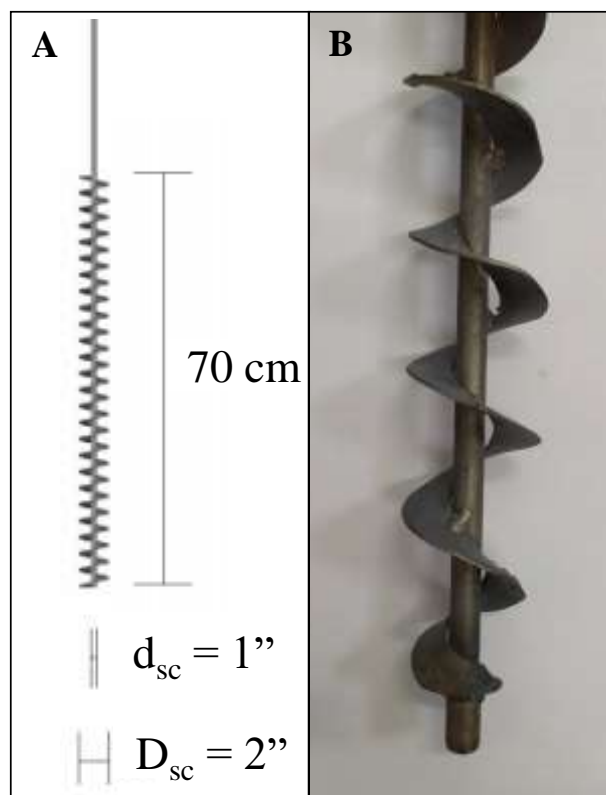


Figura 3.3 – Agitador de pás-retas (A) e pás-inclinadas (B). Agitadores utilizando três conjuntos de pás na forma de cruz (sem espaçamento entre si), fixados através de um parafuso na lateral do agitador e preso na haste.



**Figura 3.4** – Agitador tipo parafuso helicoidal.



### 3.3 Materiais utilizados

#### 3.3.1 Partículas Inertes

Partículas de vidro, alumina e polietileno foram utilizadas como sólidos nesse estudo, definidas como grupo D na classificação de Geldart. Essas partículas já foram utilizadas em outros estudos e são consideradas adequadas para experimentos com movimentação de partículas (BARROS et al., 2020) e como meio de suporte na secagem de pasta e soluções (ALMEIDA; FREIRE; FREIRE, 2010; BARROS et al., 2019; SOUSA et al., 2019). As propriedades das partículas e as diferentes condições experimentais empregadas nas configurações convencionais e mecânicas são apresentadas na Tabela 3.1.

Para o diâmetro médio das partículas, foi realizada uma análise granulométrica das partículas inertes através de peneira vibratória. O diâmetro médio foi calculado como a média entre as aberturas consecutivas das peneiras.

Propriedades das partículas como densidade e esfericidade foram utilizados baseando em estudos anteriores realizados no mesmo departamento de pesquisa (Centro de Secagem – DEQ/UFSCar) com o mesmo lote de partículas (ALMEIDA, 2009; SILVA,

2016; SOUSA, 2017; VIEIRA, 2015). Entretanto, somente para os ensaios E13-E15 que são partículas cilíndricas, a esfericidade foi determinada pela equação abaixo:

$$\emptyset = \frac{\text{Área superficial da esfera}}{\text{Área superficial da partícula}} \quad (3.1)$$

**Tabela 3.1** – Propriedades das partículas e condições experimentais usadas no leito de jorro com e sem agitação mecânica.

Ensaio	Material	$\rho_p$ (kg m <sup>-3</sup> )	$d_p$ (m)	$\emptyset$	$\varepsilon$	Massa de partículas (kg)	$H_0$ (m)
<b>E1</b>	Vidro	2500	0,0022	1,0	0,424 ± 0,001	2	0,100
<b>E2</b>						3	0,125
<b>E3</b>						4	0,150
<b>E4</b>			0,0044	1,0	0,434 ± 0,003	2	0,100
<b>E5</b>						3	0,120
<b>E6</b>						4	0,150
<b>E7</b>	Alumina	1501	0,0037	1,0	0,501 ± 0,006	2	0,130
<b>E8</b>						3	0,170
<b>E9</b>						4	0,210
<b>E10</b>	Polietileno	930	0,0037	0,93	0,435 ± 0,005	2	0,180
<b>E11</b>						3	0,235
<b>E12</b>						4	0,295
<b>E13</b>	Polietileno	930	0,0038	0,37	0,514± 0,002	2	0,218
<b>E14</b>						3	0,277
<b>E15</b>						4	0,339

Para a área superficial das partículas, foi utilizado o diâmetro médio calculado anteriormente pela abertura da peneira vibratória, entretanto para as partículas cilíndricas foram realizadas medidas individuais de cada partícula. Como essas partículas apresentam formato de um cilindro elíptico, foram determinados o diâmetro nas duas coordenadas cartesianas (x e y) e a sua altura. Com esses dados foi possível calcular a área superficial da partícula, enquanto a área superficial da esfera foi determinada através do diâmetro equivalente de uma esfera de volume igual ao volume calculado da partícula. Para esse cálculo, foram utilizadas 7 amostras, cada uma contendo 10 partículas, analisando-se um conjunto total de 70 partículas.

A porosidade do leito (fração de vazios) foi determinada pela Equação 3.2.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (3.2)$$

Para determinar a densidade bulk ( $\rho_b$ ), foi utilizada uma proveta graduada com diâmetro de 2,2 cm e volume de 250 cm<sup>3</sup>. A proveta foi preenchida com partículas através de um funil, completando em torno de 60% do volume total. As densidades bulk foram obtidas dividindo-se a massa de partículas na proveta por seu volume.

### 3.3.2 Pastas e suspensões

Para os ensaios com secagem, foram utilizados três tipos de pastas: água, carbonato de cálcio e leite desnatado. Água destilada foi utilizada como pasta “ideal”, isenta de sólidos e sem características pegajosas, como já relatado no estudo de Sousa (2017). Em relação ao carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) P. A. (min. 99,0%), devido a sua baixa solubilidade em água é considerada uma suspensão, sendo utilizada uma concentração percentual em massa de 5,0% (m/m). Essa concentração foi escolhida pelo fato de apresentar comportamento específico em relação à queda de pressão (ALMEIDA, 2009) e também por ser muito fácil de manusear e preparar, apresentando poucos problemas operacionais e de fácil secagem no leito de jorro, como já foi observado em outros estudos no Centro de Secagem da UFSCar (ALMEIDA, 2009; SILVA, 2016; BARROS, 2018).

Para preparar a suspensão de carbonato de cálcio, foi utilizada uma amostra primária, a qual apresenta distribuição granulométrica já caracterizada em estudos anteriores (BARROS, 2018). Essa mesma suspensão foi padronizada em relação a sua densidade aparente, sendo obtida por picnometria líquida, assim como a concentração de sólidos de acordo com a Equação 3.3.

A suspensão de carbonato de cálcio usada nos ensaios foi preparada utilizando-se uma balança (marca Toledo e modelo 9094C/5) para a determinação das massas. Para evitar precipitação ou entupimento de tubulações, a suspensão foi agitada durante todo o processo de alimentação do leito.

$$C_s \left( \% \frac{m}{m} \right) = \frac{m_{CaCO_3}}{m_{CaCO_3} + m_{H_2O}} * 100 \quad (3.3)$$

Para secagem de leite, foi utilizado o leite desnatado da marca Parmalat, com as seguintes informações nutricionais para 200 mL: 9,2 g, 6,6 g, 126 mg, 240 mg e 0 g de carboidratos, proteínas, sódio, cálcio e gorduras totais, respectivamente.

A determinação da fração mássica de água no início de cada experimento foi realizada pela Equação 3.5. Sendo assim, os valores da média e desvio padrão para o carbonato de cálcio (5,0%) e leite desnatado, foram de  $0,90 \pm 0,01$  e  $0,96 \pm 0,01$  em base úmida, respectivamente.

### 3.4 Procedimento experimental

#### 3.4.1 Caracterização fluidodinâmica

A caracterização fluidodinâmica do leito de jorro convencional foi realizada seguindo o procedimento já descrito por Mathur e Epstein (1974). Esse método é baseado em um gráfico de queda de pressão no leito em função da vazão do ar. A queda de pressão no leito é obtida utilizando a Equação 3.6, onde é descontada a queda de pressão do leito vazio ( $\Delta P_{\text{branco}}$ ) da queda de pressão total (leito vazio e as partículas), obtendo assim a queda de pressão do leito de partículas ( $\Delta P_L$ ).

O procedimento experimental utilizado para obter os dados do teste em branco foi análogo ao empregado no leito de jorro com partículas, sendo assim, foram obtidos dados da queda de pressão em função da velocidade do ar para vazões crescentes e decrescentes. Os dados da queda de pressão do leito vazio serviram para ajustar uma equação exponencial, no formato da Equação 3.5. A partir desses gráficos, informações como a vazão de ar de mínimo jorro ( $Q_{mj}$ ), queda de pressão máxima ( $\Delta P_{\text{max}}$ ) e queda de jorro estável ( $\Delta P_j$ ) foram obtidas. Para o leito de jorro com agitador mecânico, devido as modificações feitas no equipamento, um procedimento similar foi utilizado e foram obtidos parâmetros fluidodinâmicos como vazão de ar mínima para agitar o leito ( $Q_{al}$ ) e queda de pressão de operação para agitar o leito ( $\Delta P_{al}$ ).

$$\Delta P_L = \Delta P_{\text{total}} - \Delta P_{\text{branco}} \quad (3.4)$$

$$\Delta P_{\text{branco}} = a Q_{\text{ar}}^b \quad (3.5)$$

Os ensaios para o equipamento com agitação mecânica foram realizados com velocidades de rotação de 0, 12, 21, 60, 90, 120, 198, 240, 291, e 330 rpm respectivamente. Além desse parâmetro, os efeitos das diferentes configurações dos agitadores e dos grupos de partículas foram investigados.

Para uma análise da fluidodinâmica em relação a vazão de ar, foi utilizado o parâmetro de redução relativa (RR), onde foi estimado o aumento ou a redução da vazão de ar de cada configuração em comparação com o equipamento convencional, como apresentado na Equação 3.6. Todos os ensaios foram realizados em triplicata.

$$RR (\%) = \frac{Q_{mj} - Q_{al}}{Q_{mj}} 100 \quad (3.6)$$

Inicialmente foi feita uma análise do efeito da velocidade de rotação e das características das partículas. Posteriormente, foi utilizado o parâmetro da redução relativa para analisar o efeito das diferentes configurações de agitadores mecânicos.

### **3.4.2 Velocidade do ar**

Foi utilizado um anemômetro de fio quente (Akron- KR865) para medir a velocidade do ar no leito de partículas, no qual foi posicionado em seção transversal 0,05 m acima da base da coluna cilíndrica, como apresentado na Figura 3.1. As medições foram realizadas em várias posições radiais e angulares, coletando um total de 48 pontos no leito. Os dados foram realizados com duração de 10 s em triplicata a uma taxa de amostragem de 1,25 Hz. A temperatura do ar durante as medições foi aproximadamente constante ( $32,3 \pm 0,5$  °C).

### **3.4.3 Correlação matemática dos dados**

Neste estudo foi obtida uma correlação para prever a vazão mínima de ar para agitar o leito. Tal correlação, proposta inicialmente por Reyes e Vidal (2000), é derivada de Tsvik et al. (1967). Na correlação atualmente proposta foi acrescentado um termo referente à rotação de agitação, conforme segue:

$$Re_v = a \left( \frac{H}{D_0} \right)^b \left[ \tan \left( \frac{\theta}{2} \right) \right]^c Ar^d (1 + Re_a)^e \quad (3.7)$$

onde  $Re_v$  e  $Re_a$  representam o número de Reynolds para a vazão mínima de ar para agitar o leito e para a rotação de agitação, respectivamente, como segue:

$$Re_v = \frac{4 Q_{al} d_p \rho_g}{\mu \pi D_0^2} \quad (3.8)$$

$$Re_a = \frac{\rho_p rps \left( \frac{D_s^2 + d_s^2}{2} \right)}{\mu} \quad (3.9)$$

Para relacionar ambos os números de Reynolds, ou seja, a contribuição dada pela vazão de ar e pela rotação do agitador, a seguinte relação foi usada:

$$\phi = \frac{Re_a + Re_v}{Re_a Re_v} \quad (3.10)$$

Na Equação 3.7, Reyes e Vidal (2000) consideraram a inclinação da parede ( $\theta$ ) e o número de Arquimedes ( $Ar$ ) como constantes. No entanto, como diferentes partículas foram utilizadas neste estudo, o número de Arquimedes (Equação 11) foi considerado, conforme a Equação 3.12.

$$Ar = \frac{g d^3 \rho_g (\rho_g - \rho_s)}{\mu_g^2} \quad (3.11)$$

$$Re_v = a \left( \frac{H}{D_0} \right)^b Ar^c (1 + Re_a)^d \quad (3.12)$$

Uma metodologia semelhante foi adotada para obter correlações para prever a queda de pressão máxima e queda de pressão operacional no leito de jorro com agitação mecânica. Para tais parâmetros, foram utilizados como referência os modelos empíricos propostos por Olazar et al. (2004, 2009) para o leito de jorro convencional, mas para esse

estudo as equações foram adaptadas para incorporar os termos referentes à rotação de agitação, conforme segue:

$$\frac{\Delta P_{\max}}{H_0 \rho_b g} = a \phi^b \left(\frac{H}{D_0}\right)^c Ar^d \quad (3.13)$$

$$\Delta P_{al} = a \frac{\mu g}{rps d_p} \left(\frac{H}{D_0}\right)^b Ar^d Re_v^e (1 + Re_a)^f \quad (3.14)$$

Por fim, os coeficientes de correlação (a, b, c, d, e e f) foram encontrados ajustando-se os dados experimentais com o STATISTICA®. Esse ajuste foi realizado pelo método de regressão não linear por mínimos quadrados. Os dados experimentais e teóricos foram comparados para obtenção da qualidade do ajuste.

#### 3.4.4 Tempo de ciclo médio das partículas

Para a análise do tempo de ciclo, foram utilizadas partículas de alumina (E8), adicionando duas partículas coloridas (azul e vermelha) na superfície do leito de partículas brancas. Para colorir as partículas de alumina, elas foram submersas por 24h em solução de vermelho de metila e azul de metileno. Essas soluções são indicadores de pH, mas quando em contato com uma superfície porosa como a alumina, as partículas adquirem a coloração do pigmento.

Para mensurar o tempo de ciclo foi determinado o tempo que a partícula demora para reaparecer na superfície. Para isso, foram feitas filmagens da superfície do leito e depois analisadas em um programa de reprodução de imagens para reduzir o número de quadros por segundos a serem reproduzidos. Desta forma, foi possível quantificar o tempo de ciclo e também o tempo de permanência da partícula na superfície do leito.

Para analisar o efeito das variáveis do processo, foram utilizadas diferentes velocidades de rotação (90, 120 e 240 rpm) e vazão de ar necessária para agitar o leito (1,0 Q<sub>al</sub>, 1,25Q<sub>al</sub> e 1,50 Q<sub>al</sub>). Esse procedimento foi realizado para cada agitador utilizado nessa tese. A vazão de ar foi determinada de acordo com os dados obtidos nos parâmetros fluidodinâmicos.



Os dados obtidos, foram submetidos a um histograma para identificar a frequência de ocorrência dos valores do tempo de cada partícula. Posteriormente, os dados foram ajustados a um modelo empírico relacionando as variáveis do processo.

### 3.4.5 Secagem de pastas

Para o processo de secagem, foram utilizados três tipos de pastas (água, leite desnatado e carbonato de cálcio). Para isso, além do aparato experimental descrito na seção 3.1, foram utilizadas 4kg de partículas de vidro de 2,2 mm, como representado na Tabela 3.1 pelo ensaio E3. Com o intuito de analisar os efeitos da vazão de ar sobre a secagem em leito de jorro com e sem agitação, dois tipos de experimentos foram montados. Inicialmente foi feito com base na mesma vazão de ar do equipamento convencional ( $1,41 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$ ), já apresentada em outros estudos (BARROS, 2018). Posteriormente, foi analisado o efeito da vazão de ar baseando-se na fluidodinâmica, ou seja, vazão de ar necessária para agitar o leito ( $Q_{al}$ ). Outro conjunto de experimentos também foi utilizado para comparar o efeito somente da velocidade de rotação (90, 120, 240 rpm), para isso foi empregada a mesma configuração de agitador e mesma vazão de ar.

Para realizar tais análises, algumas condições operacionais devem ser fixadas, as quais foram baseadas em estudos anteriores de Barros (2018), devido a fatores de acúmulo, recuperação e elutrição de produto no leito. Assim, foi utilizada vazão de pasta de  $20 \text{ mL}.\text{min}^{-1}$ , temperatura do ar na secagem de  $90^\circ \text{ C}$ . As condições utilizadas nesses experimentos podem ser observadas na Tabela 3.2.

Além dos dados obtidos com a secagem nas condições operacionais apresentadas na Tabela 3.3, também foi realizada uma análise da eficiência térmica do processo ( $\eta$ ), sendo calculada pela Equação 3.15. Nessa equação, são utilizadas a temperatura do ar na entrada ( $T_{\text{entrada}}$ ) e saída ( $T_{\text{saída}}$ ) do leito e a temperatura na condição de saturação do ar na saída do leito de jorro ( $T_{\text{saturação}}$ ).

$$\eta = \frac{T_{\text{entrada}} - T_{\text{saída}}}{T_{\text{entrada}} - T_{\text{saturação}}} \quad (3.15)$$

A equação original proposta por Kudra (2004), considerava uma relação entre a energia utilizada para a evaporação da umidade (na temperatura de alimentação), e a

energia total fornecida ao equipamento. Esse tipo de análise já foi empregada em diversos estudos da literatura com secadores (FERNANDES, 2005; FILKOVÁ; MUJUMDAR, 1995; REYES; DÍAZ; MARQUARDT, 2001). Apesar desse resultado, Sousa (2017) realizou uma simplificação, substituindo a temperatura do ambiente pela temperatura na condição de saturação do ar na saída do leito de jorro, como representada na Equação 3.15.

**Tabela 3.2** – Experimentos realizados para secagem de pastas.

<b>Agitador</b>	<b>Vazão de ar (<math>\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}</math>)</b>	<b><math>\Omega</math> (rpm)</b>	<b>Pasta</b>
Pás-retas	1,30 $Q_{mj} = 1,41$	120	Água destilada
Pás-inclinadas	1,30 $Q_{mj} = 1,41$	120	Carbonato de cálcio
Pás-retas	1,30 $Q_{mj} = 1,41$	120	Carbonato de cálcio
Parafuso	1,30 $Q_{mj} = 1,41$	120	Carbonato de cálcio
LJC	1,30 $Q_{mj} = 1,41$	--	Carbonato de cálcio
Pás-inclinadas	1,30 $Q_{mj} = 1,41$	120	Leite desnatado
Pás-retas	1,30 $Q_{mj} = 1,41$	120	Leite desnatado
Parafuso	1,30 $Q_{mj} = 1,41$	120	Leite desnatado
LJC	1,30 $Q_{mj} = 1,41$	--	Leite desnatado
Pás-inclinadas	1,30 $Q_{al} = 0,88$	120	Carbonato de cálcio
Pás-retas	1,30 $Q_{al} = 1,26$	90	Carbonato de cálcio
Pás-retas	1,30 $Q_{al} = 1,26$	120	Carbonato de cálcio
Pás-retas	1,30 $Q_{al} = 1,26$	240	Carbonato de cálcio
Parafuso	1,30 $Q_{al} = 1,04$	120	Carbonato de cálcio
Pás-inclinadas	1,30 $Q_{al} = 0,88$	120	Leite desnatado
Pás-retas	1,30 $Q_{al} = 1,26$	120	Leite desnatado
Parafuso	1,30 $Q_{al} = 1,04$	120	Leite desnatado

### 3.4.6 Granulometria do produto

O tamanho das partículas do produto, é um dos requisitos de qualidade mais importantes (PALLAI; SZENTMARJAY; SZIJJÁRTÓ, 2001), para sua obtenção foi realizado, após o processo de secagem, retiradas de amostras do pó de carbonato de cálcio e do de leite desnatado afim de se analisar a sua distribuição granulométrica, diâmetro médio e o valor de span. Para isso, foi utilizado o método de difração à laser (Mastersizer MicroPlus 2000 – Malvern), com escala de medida entre 0,05 a 550  $\mu\text{m}$ , sendo as leituras no equipamento realizadas em triplicata. Para as amostras de carbonato de cálcio, estas foram dispersas em água destilada para leitura no equipamento, enquanto que para amostras de leite foi utilizado etanol absoluto (P.A. 46,07  $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$  e densidade média de 0,7903  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), devido à solubilidade do pó em cada condição. Além do tamanho em função da fração volumétrica foi obtido o diâmetro médio volumétrico ponderado ( $d_{4,3}$ ),

calculado pela Equação 3.16 (JINAPONG; SUPHANTHARIKA; JAMNONG, 2008). A variável  $n_i$  refere-se ao número de partículas de diâmetro  $d_i$ .

Para analisar a largura da distribuição das partículas, foi utilizado o parâmetro de span, sendo calculada pela Equação 3.17. Os valores de  $d_v$  correspondem ao diâmetro de uma esfera com volume equivalente ao da partícula (BOWEN, 2002), no qual para o  $d_{v50}$  metade do volume das partículas está abaixo desse valor. Os diâmetros  $d_{v10}$  e  $d_{v90}$ , definem as partículas com 10 e 90% vol. são menores que esse valor, respectivamente.

$$d_{4,3} = \frac{\sum n_i \times d_i^4}{\sum n_i \times d_i^3} \quad (3.16)$$

$$\text{Span} = \frac{d_{v90} - d_{v10}}{d_{v50}} \quad (3.17)$$

## **CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

No capítulo 4 serão apresentados os resultados e discussões, sendo divididos em subtópicos para uma melhor compreensão dos objetivos alcançados em cada etapa. Como uma das principais etapas dessa tese é o desenvolvimento de um novo tipo de configuração de agitação mecânica, duas configurações foram desenvolvidas na forma de pás-retas e pás-inclinadas. Uma outra configuração de parafuso helicoidal foi utilizada de um estudo anterior, como mencionado nos materiais e métodos. Desta forma, no intuito de compreender como as duas fases se relacionam, a primeira análise feita corresponde ao comportamento fluidodinâmico desses agitadores no leito de partículas. Sendo a primeira etapa dos resultados focada na compreensão da fluidodinâmica do leito de partículas, tendo em vista o que ocorre com o equipamento convencional em diversas condições operacionais. Para complementar a análise fluidodinâmica, também foi feito um mapa da distribuição de velocidade do ar no leito de partículas, analisando a influência da velocidade de rotação do agitador e da vazão de ar. Para realizar uma análise comparativa entre o leito com e sem agitação, foi utilizado um parâmetro definido como redução relativa da vazão de ar, o qual estima a redução da vazão de ar obtida com a adição do agitador ao leito. O efeito das propriedades das partículas também foi investigado nessa etapa, além de propor modelos matemáticos para a vazão de ar operacional e para queda de pressão. Esses resultados permitiram uma melhor compreensão do efeito causado pela presença do agitador e também quais os parâmetros fluidodinâmicos significativos com essa nova configuração de agitador.

Após essa análise, foi possível identificar as melhores condições para operar o equipamento, obtendo-se assim a menor vazão de ar para agitar o leito. Entretanto, a menor vazão de ar também pode afetar a taxa de circulação das partículas, uma vez que a relação entre vazão de ar e velocidade de rotação do agitador no tempo de ciclo das partículas não é conhecido. Desta forma, foi determinado o tempo de ciclo médio das partículas, apresentado no item 4.6, uma vez que os dados obtidos foram utilizados para ajustar um modelo empírico. Esse resultado possibilita avaliar se as condições apresentadas no item anterior são verdadeiramente melhores em comparação com a movimentação das partículas dentro do leito.

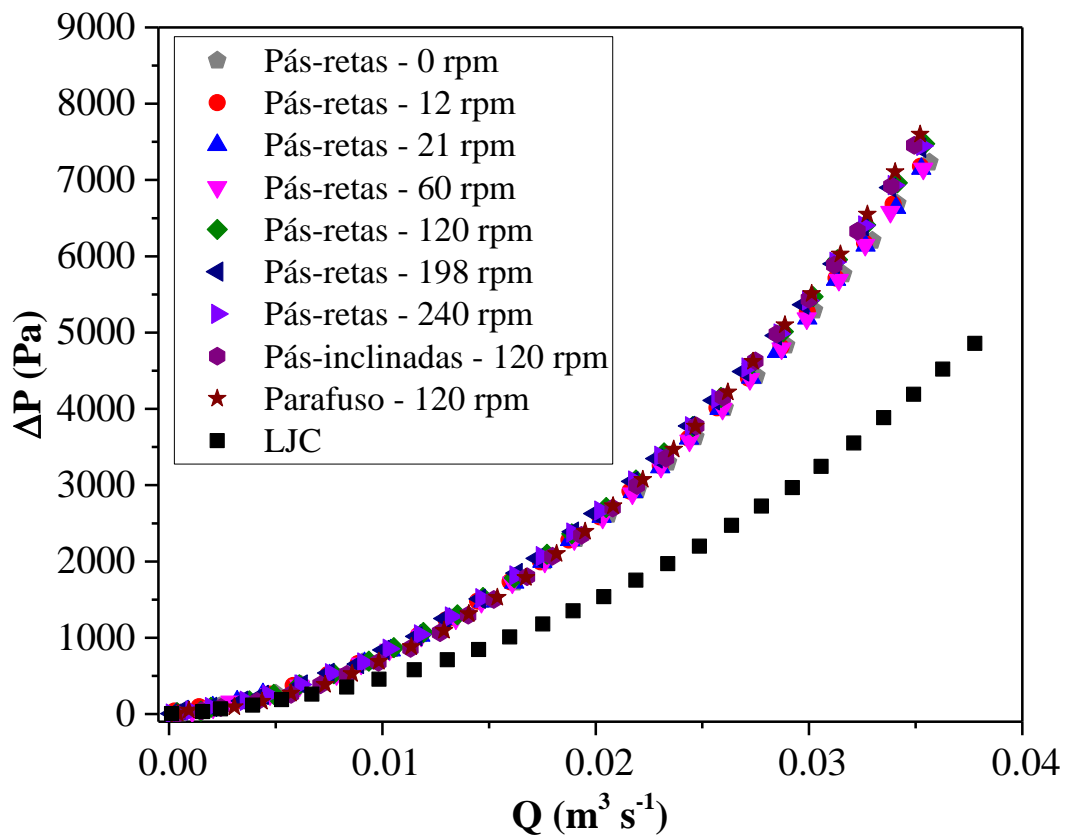
Na última etapa dessa tese, será avaliada a secagem de pastas, tanto ideal (água destilada), quanto pastas reais (carbonato de cálcio e leite desnatado). Tanto o regime

transiente quando o permanente, serão estudados para identificar como cada agitador atua sobre o leito de partículas no início do processo. Nessa etapa, uma análise sobre o comportamento dos diferentes agitadores em leitos úmidos será abordada, além de uma breve análise da eficiência energética e também da qualidade do produto final (umidade e distribuição granulométrica).

#### 4.1 Comportamento fluidodinâmico do leito de jorro convencional e do com agitação mecânica

Para a caracterização fluidodinâmica, foi feito inicialmente o teste do branco, seguindo a metodologia descrita no item 3.4 do capítulo 3. Os resultados da queda de pressão no leito vazio em diferentes velocidades de rotação, com diferentes agitadores são apresentados na Figura 4.1, além dos resultados para o leito de jorro convencional.

**Figura 4.1** – Queda de pressão do leito em função da vazão de ar para diferentes velocidades de rotação do agitador.



Observa-se que não houve diferença entre as curvas em função da velocidade de rotação, este resultado corrobora o estudo realizado por Sousa (2017) utilizando agitador mecânico com velocidade de rotação entre 180 e 540 rpm. Com esses dados, foi possível ajustar um modelo matemático para representar a queda de pressão do leito vazio para o agitador mecânico (Queda de pressão do branco para agitador mecânico –  $\Delta P_{Bam}$ ) (Equação 4.1). O modelo apresentou coeficiente de regressão de 0,9999 e foi utilizado para determinar a queda de pressão somente das partículas, como apresentado na Equação 3.5 (Queda de pressão do branco para o leito de jorro –  $\Delta P_{Blj}$ ). Um procedimento similar foi adotado para o leito de jorro convencional e o modelo ajustado é apresentado na Equação 4.2, com coeficiente de regressão de 0,9999.

$$\Delta P_{Bam} \text{ (Pa)} = 1372,576 Q^2 + 417,032 Q \quad (4.1)$$

$$\Delta P_{Blj} \text{ (Pa)} = 842,575 Q^2 + 222,892 Q \quad (4.2)$$

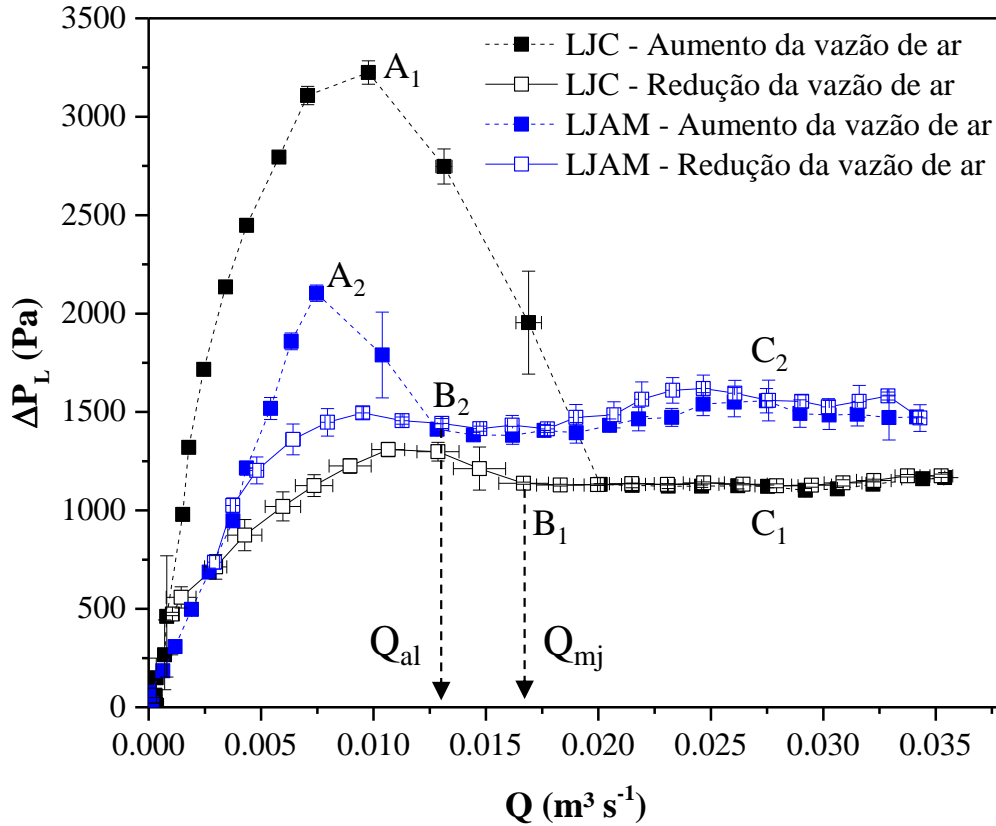
#### 4.1.1 Curva fluidodinâmica para leito de jorro com agitador mecânico

A curva fluidodinâmica, representada pela queda de pressão das partículas em função da vazão de ar para o leito de jorro com agitador mecânico e convencional pode ser observada na Figura 4.2. Curvas típicas são obtidas para o leito de jorro convencional, como as descritas por Mathur e Epstein (1974), que discutem em detalhes o comportamento qualitativo observado para o leito de jorro convencional. Quando cessa o regime de jorro (processo da redução da vazão de ar), ocorre um aumento acentuado da queda de pressão, que apresenta um pico bem menor do que a queda de pressão máxima alcançada com o aumento da vazão de ar. Tal histerese é típica do leito de jorro convencional (MATHUR; EPSTEIN, 1974; PERAZZINI et al., 2017).

Para o leito de jorro com agitação mecânica observa-se um comportamento qualitativamente semelhante ao leito de jorro convencional. Este resultado, pode ser justificado devido à geometria e a posição do agitador mecânico, que foi colocado no centro do leito. Assim, existe inicialmente um leito fixo de partículas entre a entrada de ar e a extremidade inferior do agitador. Além de explicar o comportamento dinâmico semelhante ao leito de jorro convencional observado na Figura 4.2, tal leito de partículas no fundo também permite o escoamento cruzado de sólidos da região anular para o centro

do leito (jato mecânico). Portanto, o movimento circular intensivo das partículas, que é típico dos leitos de jorro convencionais, é mantido no leito de jorro com agitação mecânica proposto.

**Figura 4.2** – Queda de pressão em função da vazão de ar para o leito de jorro convencional (1) e com agitador mecânico (2) para pás-retas (120 rpm). Dados: Esferas de vidro, 3 kg e 2,2 mm (Ensaio E2).



O comportamento semelhante observado entre os equipamentos também pode ser justificado devido às características do agitador utilizado nesse trabalho. Nesse tipo de agitador de pás-retas, ocorre a movimentação de quase todo o leito, devido às pás possuírem comprimento suficiente para ficarem próximas da parede do leito, facilitando a movimentação das partículas e a passagem de ar. Apesar desse resultado, estudos da literatura indicam que cada tipo de configuração do agitador pode ocasionar um tipo de comportamento fluidodinâmico. Reyes e Vidal (2000) observaram comportamento semelhante ao de um leito fluidizado com a inserção do agitador de geometria cônica, enquanto Sousa et al. (2019) relataram uma queda de pressão quase constante à medida que a vazão de ar aumenta com agitador tipo parafuso helicoidal. Esses resultados sugerem que o comportamento dinâmico do leito de jorro com agitação mecânica é função da geometria do agitador empregado.

Apesar da semelhança qualitativa observada na Figura 4.2, diferenças significativas são observadas em relação aos valores dos parâmetros fluidodinâmicos devido à inserção do agitador. Para o leito de jorro convencional o aumento da vazão de ar provoca um aumento linear na queda de pressão, comportamento análogo ao leito fluidizado. Esse comportamento ocorre até a região  $A_1$ , onde a queda de pressão máxima ( $\Delta P_{\max}$ ) é atingida. Para o leito de jorro com agitador mecânico o mesmo processo ocorre ( $A_2$ ), mas verifica-se que os valores da  $\Delta P_{\max}$  para o LJAM são inferiores ao LJC, fato esse justificado devido a presença do agitador o que faz com que uma menor energia seja necessária para iniciar a formação do canal no centro do leito. Após essa região de máxima queda de pressão, ocorre uma brusca redução da queda de pressão devido ao rompimento do leito e formação do jorro, enquanto no LJAM um processo similar pode ocorrer na região entre o distribuidor e o agitador, favorecendo a formação do jato mecânico. Com maiores vazões de ar, ambos os equipamentos não apresentam grandes variações na queda de pressão, mas são regiões mais instáveis ( $C_1$  e  $C_2$ ) que podem provocar mudanças nos regimes hidrodinâmicos (secção 2.1.3) e até o transporte pneumático das partículas.

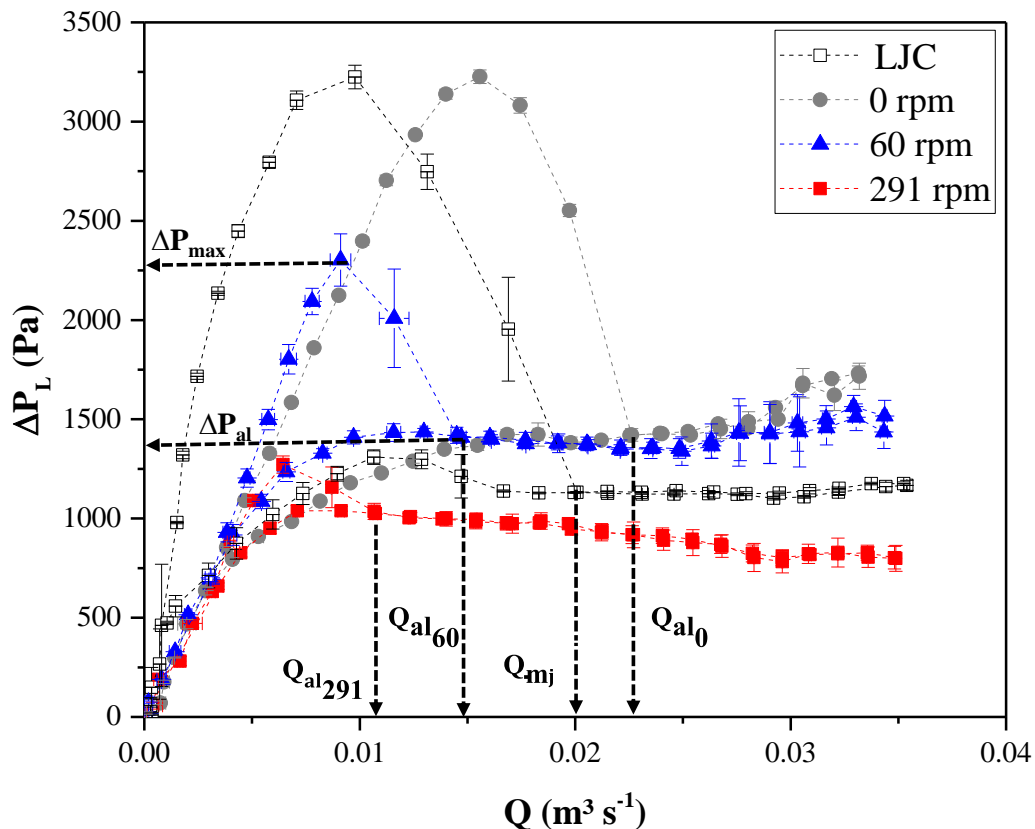
No processo de redução da vazão de ar, nota-se que para o LJC uma vazão de mínimo jorro é obtida na região ( $B_1$ ), sendo essa a menor energia fornecida pela vazão de ar para manter o jorro estável e que não ocorre o colapso do jorro, causando um aumento da queda de pressão. Contudo, no LJAM além de não ocorrer o jorro o movimento das partículas é dado pela contribuição simultânea da vazão de ar e a rotação do agitador. De forma análoga, foi estipulado que o ponto indicado por  $B_2$  na Figura 4.2 representa a vazão de ar para agitar o leito ( $Q_{al}$ ). Esse parâmetro foi determinado devido ao ponto  $B_2$  representar uma intersecção no gráfico entre a corrente de aumento e a redução da vazão de ar. Desta forma, o emprego dessa técnica permite determinar uma vazão de ar menor do que a vazão do equipamento convencional devido à contribuição da agitação mecânica no leito de partículas.

Sendo assim, neste estudo será estimada a velocidade mínima de jorro para o leito de jorro com agitação mecânica com base no jorro interno que rompe a superfície do leito quando ocorre uma diminuição acentuada na queda de pressão pelo aumento da vazão de ar. Mesmo no leito de jorro cônico, Wang et al. (2004) relataram que vários autores definiram a velocidade mínima de jorro com base no início do jorro interno, ou seja, no aumento da vazão de ar e não na redução da vazão de ar como acontece pela metodologia de Mathur e Epstein (1974).



Na mesma região onde foram determinadas as vazões de ar, são obtidas as quedas de pressões operacionais de ambas as configurações. Para o leito de jorro com agitador mecânico foi considerado a  $\Delta P$  na região B<sub>2</sub> como queda de pressão operacional para agitar o leito ( $\Delta P_{al}$ ). Sendo que a diferença entre a  $\Delta P_j$  (B<sub>1</sub>) e  $\Delta P_{al}$  (B<sub>2</sub>) pode ser justificada devido à presença do agitador, que causa uma maior resistência ao escoamento do ar (BRITO et al., 2018; SZENTMARJAY; PALLAI; TÓTH, 2011), sendo que no LJC o ar escoo pelo canal do jorro formado no centro (MATHUR; EPSTEIN, 1974), tendo uma menor resistência ao escoamento. Como o canal do jorro no equipamento convencional não se altera com a mesma vazão de ar, seus parâmetros fluidodinâmicos determinados anteriormente são constantes, entretanto para o leito de jorro com agitador mecânico podem sofrer alterações devido à velocidade de rotação do agitador. Esse comportamento pode ser observado na Figura 4.3 para diferentes velocidades de rotação para o agitador de pás-retas.

**Figura 4.3** – Queda de pressão em função da vazão de ar no leito de jorro com agitador mecânico com diferentes velocidades de rotação do agitador de pás-retas. Dados: Massa de partículas de vidro de 3 kg e diâmetro de 2,2 mm (Ensaio E2).



A Figura 4.3 apresenta a queda de pressão das partículas em função da vazão de ar para diferentes velocidades de rotação do agitador de pás-retas. Para este último é apresentado com velocidade de rotação de 0, 60 e 291 rpm, respectivamente. Apesar da menor contribuição para a movimentação das partículas, em baixas rotações do agitador, foi verificado que a curva fluidodinâmica é qualitativamente semelhante em diferentes velocidades de rotação. Desta forma, utilizando o mesmo método empregado anteriormente para determinar os parâmetros fluidodinâmicos ( $Q_{al}$ ,  $\Delta P_{al}$  e  $\Delta P_{max}$ ), foi possível determinar para todos os ensaios em diferentes velocidades de rotação, como mencionado no item 4.1.

Em relação apenas à inserção do agitador, ou seja, o processo com 0 rpm (sem contribuição da movimentação do agitador), um deslocamento da curva característica em relação ao LJC é observado, uma vez que é necessária uma maior vazão de ar para estabelecer o mesmo regime de jorro com queda de pressão máxima semelhante. Tal resultado pode ser atribuído ao desvio da vazão de ar para a região anular com a inserção do agitador. À medida que a rotação do agitador aumenta, ou seja, 60 e 291 rpm, não há deslocamento e a queda de pressão máxima diminui, proporcionando maior distinção em relação à configuração do LJC. O aumento da velocidade de rotação do agitador reduz a resistência à vazão de ar pela região central e aumenta o grau de agitação das partículas na região anular. Da mesma forma, no leito de jorro com agitação mecânica, não há aumento na queda de pressão quando o regime de jorro entra em colapso pela diminuição da vazão de ar, o que também pode ser atribuído ao alto grau de agitação das partículas fornecidos pelo agitador, mesmo sob menor vazão de ar. Além disso, a histerese entre as curvas crescentes e decrescentes da vazão de ar também diminui com o aumento da velocidade de rotação do agitador (NÉMETH; PALLAI; ARADI, 1983; SZENTMARJAY; SZALAY; PALLAI, 1992).

Em relação à queda de pressão operacional, observa-se uma transição visto que o LJAM apresenta valores maiores do que o LJC para baixa rotação do agitador (60 rpm) e valores menores que o LJC para alta rotação do agitador (291 rpm). Esse resultado ocorre devido ao LJAM apresentar uma maior resistência ao escoamento do ar provocado pela presença do agitador como mencionado anteriormente. Apesar desse resultado, nota-se que em maiores velocidades de rotação a resistência provocada pela presença do agitador é minimizada, possivelmente pelo aumento da porosidade do leito. Esse processo também pode ser justificado devido a um efeito de alargamento do canal formado no centro do leito do jorro com agitador mecânico, como será abordado no item 4.3.

Para o LJAM, diferentes comportamentos hidrodinâmicos podem ocorrer dependendo da velocidade de rotação do agitador, uma vez que as partículas do leite sofrem ação da força proveniente da vazão de ar (força ascendente) e do agitador (força centrífuga). Quando utilizada baixa velocidade de rotação ( $\pm 60$  rpm), um processo diferente acontece tanto para a passagem de ar quanto para o movimento das partículas. Como o agitador não possui velocidade suficiente para desobstruir o canal no centro do leite, o ar escoar entre os espaços das pás percolando o leite. Nesse caso, se aplicadas elevadas vazões de ar pode ocorrer a formação de mini-jorros entre as pás ou até mesmo um leite pulsante ou borbulhante. Quando em altas rotações ( $\geq 120$  rpm), a força resultante da combinação da vazão de ar e rotação do agitador faz com que as partículas sejam lançadas para cima em direção à parede do vaso cilíndrico, favorecendo que o canal no centro do leite fique mais desobstruído, facilitando dessa forma a passagem de ar. Esse resultado supõe que o efeito da velocidade de rotação sobre os parâmetros fluidodinâmicos pode ser limitado, como pode ser observado pela Tabela 4.1, que mostra os parâmetros fluidodinâmicos obtidos para todas as rotações do agitador de pás-retas avaliadas.

**Tabela 4.1** – Parâmetros fluidodinâmicos para todas as velocidades de rotação para agitador de pás-retas.

Dados: Partículas de vidro, 3 kg e 2,2 mm (Ensaio E2).

<b>Rotação (rpm)</b>	<b><math>u_{al}</math> (<math>m s^{-1}</math>)</b>	<b><math>\Delta P_{al}</math> (Pa)</b>	<b><math>\Delta P_{max}</math> (Pa)</b>
<b>LJC**</b>	21,7 $\pm$ 0,5 <sup>c*</sup>	1140,0 $\pm$ 10,0 <sup>c</sup>	3200,0 $\pm$ 60,0 <sup>a</sup>
<b>0</b>	32,0 $\pm$ 0,0 <sup>a</sup>	1420,0 $\pm$ 20,0 <sup>a</sup>	3230,0 $\pm$ 50,0 <sup>a</sup>
<b>12</b>	29,0 $\pm$ 3,0 <sup>ab</sup>	1400,0 $\pm$ 100,0 <sup>ab</sup>	3700,0 $\pm$ 500,0 <sup>a</sup>
<b>21</b>	26,0 $\pm$ 1,0 <sup>b</sup>	1400,0 $\pm$ 70,0 <sup>ab</sup>	3400,0 $\pm$ 200,0 <sup>a</sup>
<b>60</b>	20,7 $\pm$ 0,4 <sup>cd</sup>	1400,0 $\pm$ 40,0 <sup>a</sup>	2300,0 $\pm$ 200,0 <sup>b</sup>
<b>90</b>	19,0 $\pm$ 1,0 <sup>cd</sup>	1400,0 $\pm$ 10,0 <sup>ab</sup>	2150,0 $\pm$ 70,0 <sup>bc</sup>
<b>120</b>	18,3 $\pm$ 0,1 <sup>cde</sup>	1430,0 $\pm$ 40,0 <sup>a</sup>	2100,0 $\pm$ 50,0 <sup>bc</sup>
<b>198</b>	17,0 $\pm$ 0,2 <sup>de</sup>	1160,0 $\pm$ 70,0 <sup>c</sup>	1700,0 $\pm$ 200,0 <sup>cd</sup>
<b>240</b>	14,8 $\pm$ 0,2 <sup>e</sup>	1090,0 $\pm$ 60,0 <sup>c</sup>	1400,0 $\pm$ 200,0 <sup>d</sup>
<b>291</b>	14,0 $\pm$ 1,0 <sup>e</sup>	1030,0 $\pm$ 40,0 <sup>c</sup>	1270,0 $\pm$ 60,0 <sup>d</sup>
<b>330</b>	14,4 $\pm$ 0,3 <sup>e</sup>	1200,0 $\pm$ 100,0 <sup>cb</sup>	1400,0 $\pm$ 100,0 <sup>d</sup>

\*Médias seguidas por uma letra diferente em uma determinada coluna são significativamente diferentes em  $p < 0,05$  pelo teste de Tukey.

\*\*No processo sem agitação (LJC) a velocidade do ar é representada pela velocidade de mínimo jorro ( $u_{mj}$ ).

O aumento da velocidade de rotação promoveu a redução da  $u_{al}$ , mas após 240 rpm não houve diferença significativa entre os resultados. Esse resultado indica que a redução da vazão de ar, é minimizada com o aumento da velocidade de rotação, devido ao efeito de alargamento do canal do jato mecânico, obtendo, dessa forma, um limite operacional. Resultado semelhante também foi observado para queda de pressão, onde não houve diferença significativa para valores de  $\Delta P_{al}$  e  $\Delta P_{max}$  acima de 198 rpm. Essa relação entre a queda de pressão e a rotação do agitador também foi observada por Szentmarjay, Szalay e Pallai (1992). Além de resultados semelhantes, esses autores também relataram que o aumento da velocidade de rotação reduz a vazão de ar pelo jorro, proporcionando a diminuição da queda de pressão no leito.

Outro resultado que pode ser observado é para a  $\Delta P_{al}$ , onde não houve diferença significativa entre 0 e 120 rpm, sendo estes valores maiores do que o equipamento convencional. Esse resultado é devido ao grau de agitação das partículas proporcionado pela baixa rotação do agitador (<198 rpm) ser insuficiente para superar a resistência adicional à vazão de ar imposta pelas pás do agitador (BRITO et al., 2018; SZENTMARJAY; PALLAI; TÓTH, 2011). Para os valores de  $\Delta P_{max}$  no LJAM, estes também não tiveram diferença significativa entre 0 e 60 rpm, devido principalmente a baixa movimentação do leito. Em comparação com os resultados no LJC, os valores foram inferiores a partir de 60 rpm. Esses resultados indicam que existe um valor mínimo da velocidade de rotação para ter uma contribuição significativa no alargamento do canal de jorro, facilitando o escoamento do ar e assim obtendo uma menor queda de pressão.

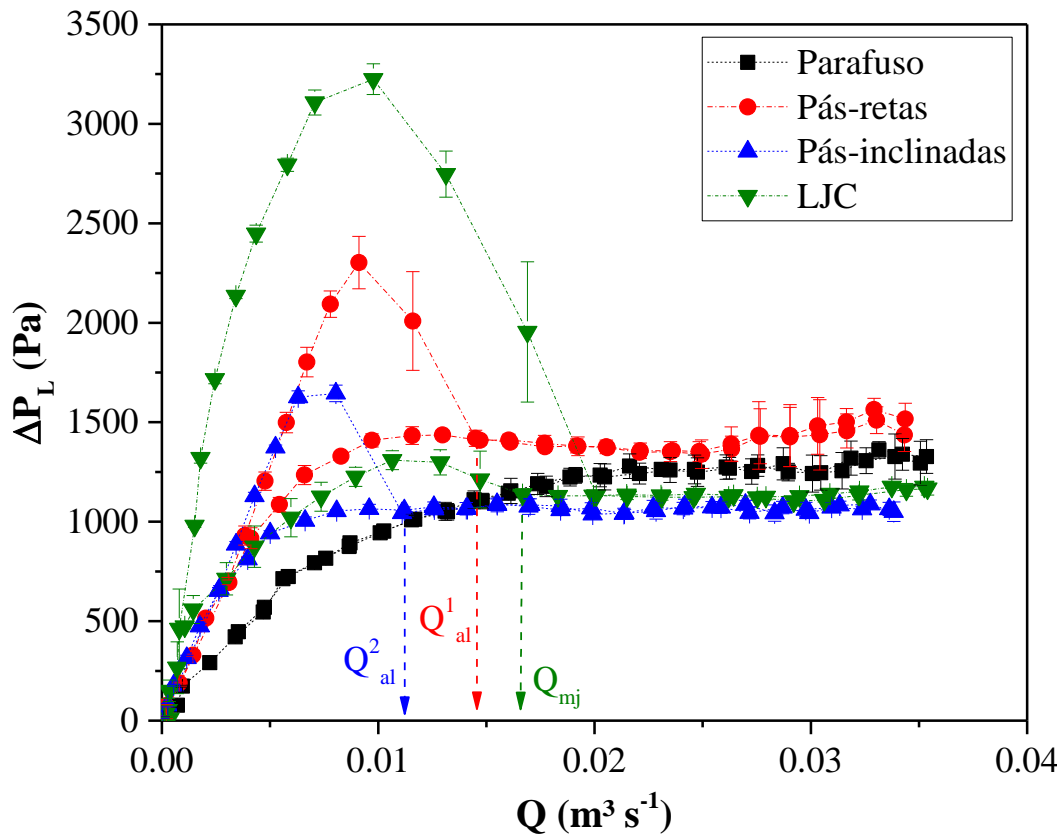
Para as melhores condições operacionais, velocidade de rotação de 240 rpm, os parâmetros fluidodinâmicos apresentaram uma redução em comparação com o equipamento convencional de 32%, 4% e 56% para  $u_{al}$ ,  $\Delta P_{al}$  e  $\Delta P_{max}$ , respectivamente. Apesar dos resultados satisfatórios promovidos pela redução dos parâmetros fluidodinâmicos, outras configurações de agitadores podem proporcionar melhorias mais significativas no processo. Desta forma, a secção seguinte irá abordar o comportamento fluidodinâmico e os parâmetros operacionais para diferentes configurações e em diferentes velocidades de rotação dos agitadores.

#### **4.1.2 Curva fluidodinâmica para diferentes agitadores**

A Figura 4.4 apresenta as curvas fluidodinâmica característica (queda de pressão das partículas em função da vazão de ar) para o LJC e LJAM com diferentes tipos de

agitadores. Para analisar as diferentes configurações com agitadores, utilizou-se a velocidade de rotação fixa de 60 rpm. Os comportamentos observados para os agitadores de pás-inclinadas e pás-retas são qualitativamente análogos ao equipamento convencional. Observa-se que o agitador de pás-inclinadas proporcionou uma maior redução na queda de pressão máxima e operacional em comparação com o de pás-retas. Além disso, a queda de pressão operacional para o agitador de pás-inclinadas foi menor do que a obtida no leito de jorro convencional, mesmo para uma velocidade de rotação de 60 rpm. Esse resultado é justificado devido à inclinação das pás, que favorece o movimento ascendente das partículas, melhorando a movimentação das mesmas no leito. Esse resultado corrobora os dados da literatura, os quais mostram que agitadores com alguma inclinação levam a melhores resultados na queda de pressão do que outras configurações (BAIT et al., 2011).

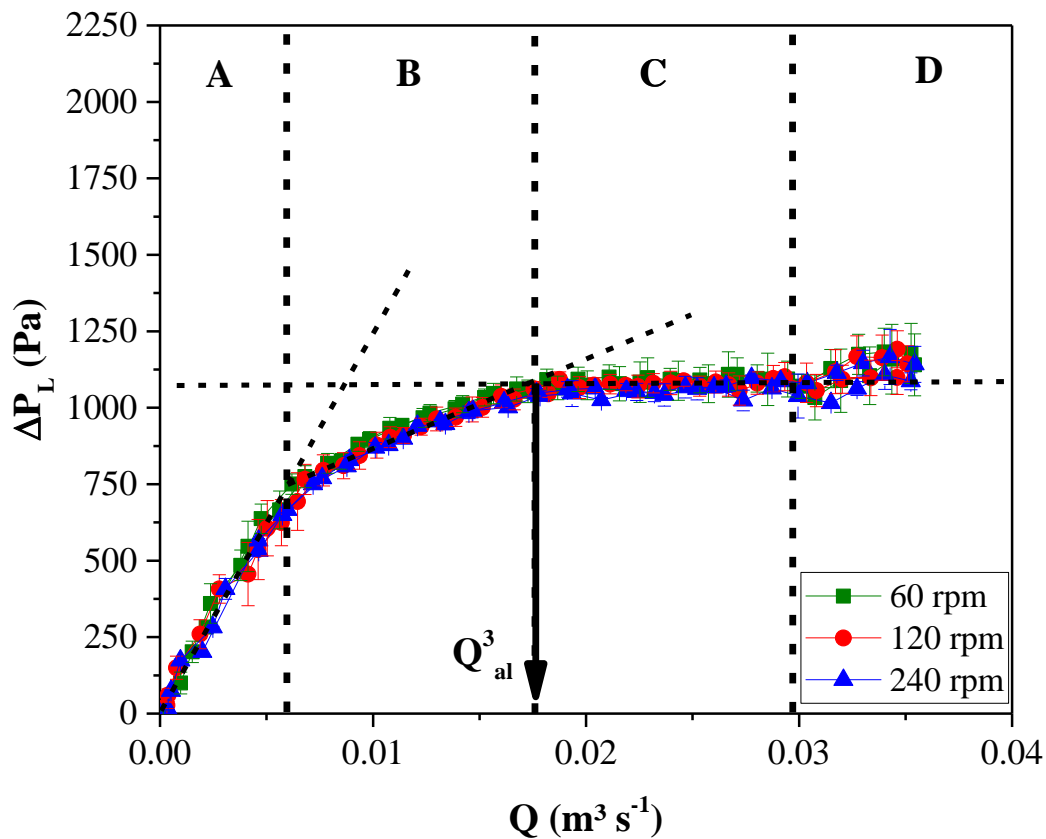
**Figura 4.4** – Queda de pressão em função da vazão de ar para o leito de jorro convencional e com agitação mecânica para diferentes configurações de agitadores. Dados: Partículas de vidro com 3kg, 2,2 mm (Ensaio E2) e 60 rpm.



Como apresentado no item anterior, o método para determinar a vazão de ar necessária para agitar o leito ( $Q_{al}$ ) foi utilizado para as demais configurações dos

agitadores. A vazão de ar para o agitador do tipo pás-inclinadas ( $Q_{al}^2$ ) foi aproximadamente 32% menor do que para pás-retas ( $Q_{al}^1$ ) e 38% menor do que o para o equipamento convencional ( $Q_{mj}$ ). Esse resultado indica um melhor desempenho ao utilizar pás com alguma inclinação, promovendo uma maior movimentação ascendente das partículas. Para o agitador tipo parafuso não foi possível determinar a vazão de ar pelo mesmo método, uma vez que o comportamento fluidodinâmico observado na Figura 4.4 é significativamente diferente das demais configurações utilizadas. Desta forma, um procedimento diferente foi utilizado para estimar a vazão de ar necessária para agitar o leito com parafuso helicoidal ( $Q_{al}^3$ ), como apresentado na Figura 4.5.

**Figura 4.5** – Queda de pressão em função da vazão de ar para leito de jorro com agitador mecânico com parafuso helicoidal. Dados: Partículas de vidro, 3 kg e 2,2 mm.



Nota-se que a velocidade de rotação não afeta o comportamento da curva fluidodinâmica para o agitador tipo parafuso, como já relatado em outro estudo (SOUSA, 2017). Apesar desse resultado, nota-se que ocorre uma variação significativa na queda de pressão em função do aumento da vazão de ar. Um comportamento similar já foi observado por Reyes e Vidal (2000) para agitador cônico, observado um aumento linear da queda de pressão e logo em seguida uma região estável (obtendo uma reta na queda de

pressão). Esse comportamento foi comparado com o leito fluidizado, obtendo uma vazão mínima de pseudo-fluidização. Seguindo o mesmo princípio dos autores mencionados anteriormente, foram utilizadas retas (linhas pontilhadas sobre os dados experimentais) para delimitar 4 principais regiões, como mostra na Figura 4.5.

Baseando nas linhas traçadas na Figura 4.5, as regiões A, B, C e D foram definidas para a curva fluidodinâmica referente a massa de 3 kg de partículas. Na região A existe uma inclinação mais acentuada do que as demais regiões, indicando uma menor porosidade do leito no processo inicial. Nessa região, ocorre um rápido aumento da queda de pressão de forma linear com o aumento da vazão de ar. Apesar desse resultado, essa inclinação ainda é menor do que as obtidas pelos outros agitadores e pelo leito de jorro convencional (Figura 4.4).

Na região B, fica evidente que a inclinação da reta é menor do que na região A. Esse resultado é consequência do efeito de expansão do leito, para o qual existe um limite representado pelo valor máximo da queda de pressão indicado entre as regiões B e C. Na interfase entre essas duas regiões é possível estimar a vazão de ar necessária para agitar o leito ( $Q_{al}^3$ ) e a queda de pressão operacional, sendo essa igual à queda de pressão máxima.

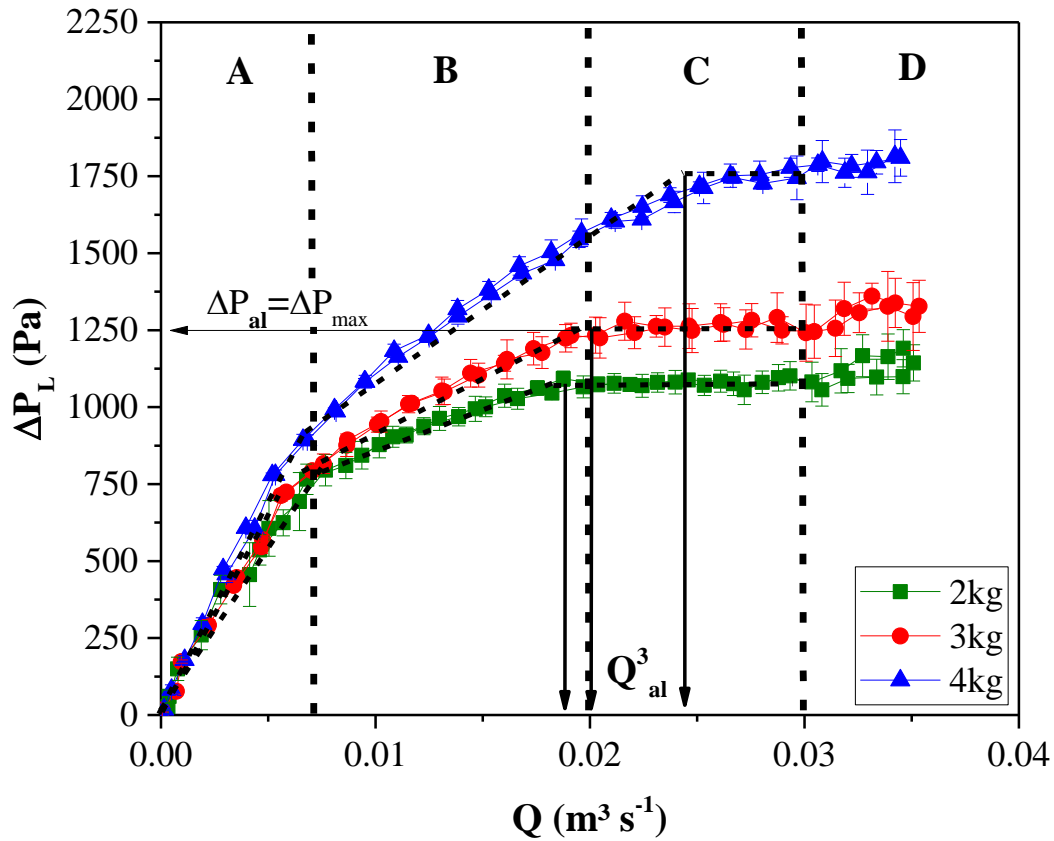
Na região C, o aumento da vazão de ar não altera a queda de pressão, uma vez que a porosidade média do leito atingiu seu valor máximo, valor esse que permanece estável com o aumento da vazão, enquanto a operação for estável. Após a região C, a velocidade do ar se aproxima da velocidade terminal das partículas, provocando o arraste das mesmas. Sendo assim, a região D é delimitada por uma instabilidade provocada pela alta vazão de ar, ocorrendo em alguns casos o fenômeno de leito borbulhante ou pistonado.

Os dados apresentados na Figura 4.5 foram obtidos para mesma massa de partículas, entretanto a curva fluidodinâmica apresenta comportamento diferente para outras massas de partículas no leito, como pode ser observado na Figura 4.6. Nota-se que para massa de 4 kg, a queda de pressão máxima é relativamente superior as demais, justificado pela maior altura do leito estático, dificultando o escoamento do ar. Esse resultado indica que o aumento da queda de pressão em função da massa de inerte não é uma relação proporcional, obtendo valores mais significativos para maiores massas de partículas.

Na região A da Figura 4.6, o efeito da massa de partículas não foi significativo na queda de pressão. Entretanto, nota-se que o efeito desse parâmetro se torna mais dependente, alterando o ângulo de inclinação de acordo com a massa. Um máximo é

atingido para todas as massas na interface entre as regiões B e C, além da vazão de ar ( $Q^3_{al}$ ). Na região C, os valores de queda de pressão ficam praticamente constante com o aumento da vazão de ar, mas é observado um suave aumento da perda de carga acima de  $0,03 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .

**Figura 4.6** – Queda de pressão em função da vazão de ar para o leito de jorro com agitador mecânico de parafuso helicoidal. Dados: Partículas de vidro, 2,2mm e 120 rpm. Regiões A, B, C e D foram delimitadas baseando na massa de 3 kg de partículas.



No intuito de analisar os resultados obtidos nas Figuras 4.5 e 4.6 (agitador tipo parafuso helicoidal), com os dados dos demais configurações dos agitadores, utiliza-se a Tabela 4.2, fixando a massa de partículas e comparando em diferentes velocidades de rotação.

Analisando os três agitadores em uma mesma velocidade de rotação (letras minúsculas no teste de Tukey), pode-se notar que os melhores resultados de  $u_{al}$  foram obtidos ao se utilizar pás-inclinadas e os menos favoráveis para o parafuso. Para a queda de pressão máxima foi maior para pás-retas em todas as condições, com exceção da velocidade de rotação de 240 rpm, na qual não houve diferença desse parâmetro entre os três agitadores.



**Tabela 4.2** – Parâmetros fluidodinâmicos para diferentes agitadores e o leito de jorro convencional.

Dados: Partículas de vidro, 3 kg e 2,2 mm (Ensaio E2).

$\Omega$ (rpm)	Agitador	$u_{al}$ (m s <sup>-1</sup> )	$\Delta P_{al}$ (Pa)	$\Delta P_{max}$ (Pa)
-	LJC*	21,7±0,5	1140,0±10,0	3200,0±60,0
60	Pás-retas	20,7±0,4 <sup>bB**</sup>	1400,0±40,0 <sup>aB</sup>	2300,0±200,0 <sup>aB</sup>
	Pás-inclinadas	15,7±0,1 <sup>cA</sup>	1040,0±10,0 <sup>abA</sup>	1680,0±20,0 <sup>bB</sup>
	Parafuso	27,0±2,0 <sup>aA</sup>	1300,0±200,0 <sup>bA</sup>	1300,0±200,0 <sup>bA</sup>
90	Pás-retas	19,0±1,0 <sup>bB</sup>	1400,0±10,0 <sup>aB</sup>	2150,0±70,0 <sup>aB</sup>
	Pás-inclinadas	15,0±1,0 <sup>cA</sup>	1150,0±3,0 <sup>cC</sup>	1700,0±100,0 <sup>bB</sup>
	Parafuso	26,0±1,0 <sup>aA</sup>	1260,0±20,0 <sup>bA</sup>	1260,0±20,0 <sup>cA</sup>
120	Pás-retas	18,3±0,1 <sup>bC</sup>	1430,0±40,0 <sup>aB</sup>	2100,0±50,0 <sup>aB</sup>
	Pás-inclinadas	14,6±0,8 <sup>cA</sup>	1110,0±40,0 <sup>cC</sup>	1700,0±60,0 <sup>bB</sup>
	Parafuso	26,0±1,0 <sup>cA</sup>	1250,0±70,0 <sup>bA</sup>	1250,0±70,0 <sup>cA</sup>
240	Pás-retas	14,8±0,2 <sup>bA</sup>	1090,0±60,0 <sup>bA</sup>	1400,0±200,0 <sup>aA</sup>
	Pás-inclinadas	13,0±1,0 <sup>bA</sup>	900,0±7,0 <sup>cB</sup>	1260,0±40,0 <sup>aA</sup>
	Parafuso	25,2±0,4 <sup>aA</sup>	1220,0±60,0 <sup>aA</sup>	1220,0±60,0 <sup>aA</sup>

\* Para o LJC foi utilizado a velocidade de mínimo de jorro ( $u_{mj}$ ).

\*\*ANOVA e teste de Tukey: Para os três agitadores na mesma velocidade de rotação (letras minúsculas) e para o mesmo agitador com diferentes rotações (letras maiúsculas).

O agitador tipo parafuso apresentou baixos valores da  $\Delta P_{max}$  em comparação com o LJC, mesmo em baixas rotações, o que não ocorre nos outros agitadores. Esse resultado deve-se ao fato do agitador tipo parafuso não gerar um mini leito no espaço entre o distribuidor de ar e o início do agitador, como ocorre nos demais agitadores.

O agitador de pás-inclinadas não apresentou diferença significativa para  $u_{al}$  em função do aumento da velocidade de rotação, apesar do valor médio ser menor para 240 rpm, como mostram as letras maiúsculas na Tabela 4.2. Por outro lado, o agitador de pás-retas atingiu seu valor mínimo da  $u_{al}$  em 240 rpm, sendo que para maiores velocidades de rotação esse parâmetro não é afetado, como já apresentado na Tabela 4.1. Esse resultado indica que o agitador de pás-inclinadas consegue operar com menor velocidade de rotação, para um menor valor da  $u_{al}$ , proporcionando uma redução no consumo energético. Apesar desse comportamento, os dois agitadores apresentaram resultados similares para a  $u_{al}$  na velocidade de rotação de 240 rpm, o que indica uma redução do efeito do tipo de agitador para altos valores da velocidade de rotação.

Com relação ao leito de jorro convencional, nota-se uma redução da velocidade do ar para rotações do agitador acima de 60 rpm, com exceção do agitador tipo parafuso. Para este último, foi observada uma redução nos picos de pressão em relação ao LJC, mesmo para baixas rotações, comportamento que pode ser atribuído ao escoamento de ar dentro do leito. Desta forma, acredita-se que o perfil de distribuição do ar dentro do leito possa afetar os parâmetros fluidodinâmicos, sendo afetado também pela velocidade de rotação do agitador. Sendo assim, no próximo item será abordado o perfil de distribuição do ar em diferentes condições operacionais.

## 4.2 Velocidade do ar

A Figura 4.7 apresenta um mapa de velocidade do ar no leito para o agitador de pás-retas, sendo que cada coluna refere-se uma velocidade de rotação diferente (60, 120 e 291 rpm). Para as linhas (Figura 4.7-A, B e C), que são indicadas para diferentes vazões de ar que correspondem à queda de pressão máxima ( $0,55 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ ), vazão de mínimo jorro ( $0,88 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ ) e região instável ( $1,41 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ ), respectivamente.

Conforme observado na Figura 4.7, um aumento na rotação do agitador sob uma vazão de ar análoga leva a um aumento na velocidade do ar na região central. Além disso, uma distribuição mais uniforme da velocidade do ar é alcançada em baixas rotações do agitador. Apesar desse resultado, nota-se que para a Figura 4.7-C na velocidade de rotação de 60 rpm uma distribuição mais heterogênea, mesmo em baixa rotação. Esse resultado pode ser justificado pela elevada vazão de ar empregada ( $1,41 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ ), a qual promove um processo instável. Como não há formação do canal preferencial no centro do leito com 60 rpm, a maior vazão de ar necessita de uma grande área de escoamento, provocando o efeito de leito borbulhante ou a formação de mini jorro, como já mencionado anteriormente.

O comportamento mais heterogêneo do LJAM para maiores velocidades de rotação, apresentado na Figura 4.7, também pode ser justificado pelo efeito de alargamento do canal preferencial formado no centro do leito. Desta forma, além da distribuição da velocidade do ar, a rotação do agitador pode influenciar na geometria do canal do jorro e no movimento das partículas. O processo de “alargamento do canal do jato mecânico” pode ser observado na Figura 4.8 para rotações de 60, 120 e 291 rpm. Nota-se que com 60 rpm a agitação não atinge diretamente as partículas próximas à parede do equipamento, ocorrendo movimentação das partículas somente onde existe

contato direto com as pás do agitador. Com o aumento da velocidade de rotação, observa-se a formação do canal no centro do leito, o qual aumenta em função da rotação do agitador, entretanto existe um limite para a largura do canal formado. Esse limite também justificado por que não há mais diferença significativa nos dados dos parâmetros fluidodinâmicos observados na Tabela 4.1 (limite de 240 rpm).

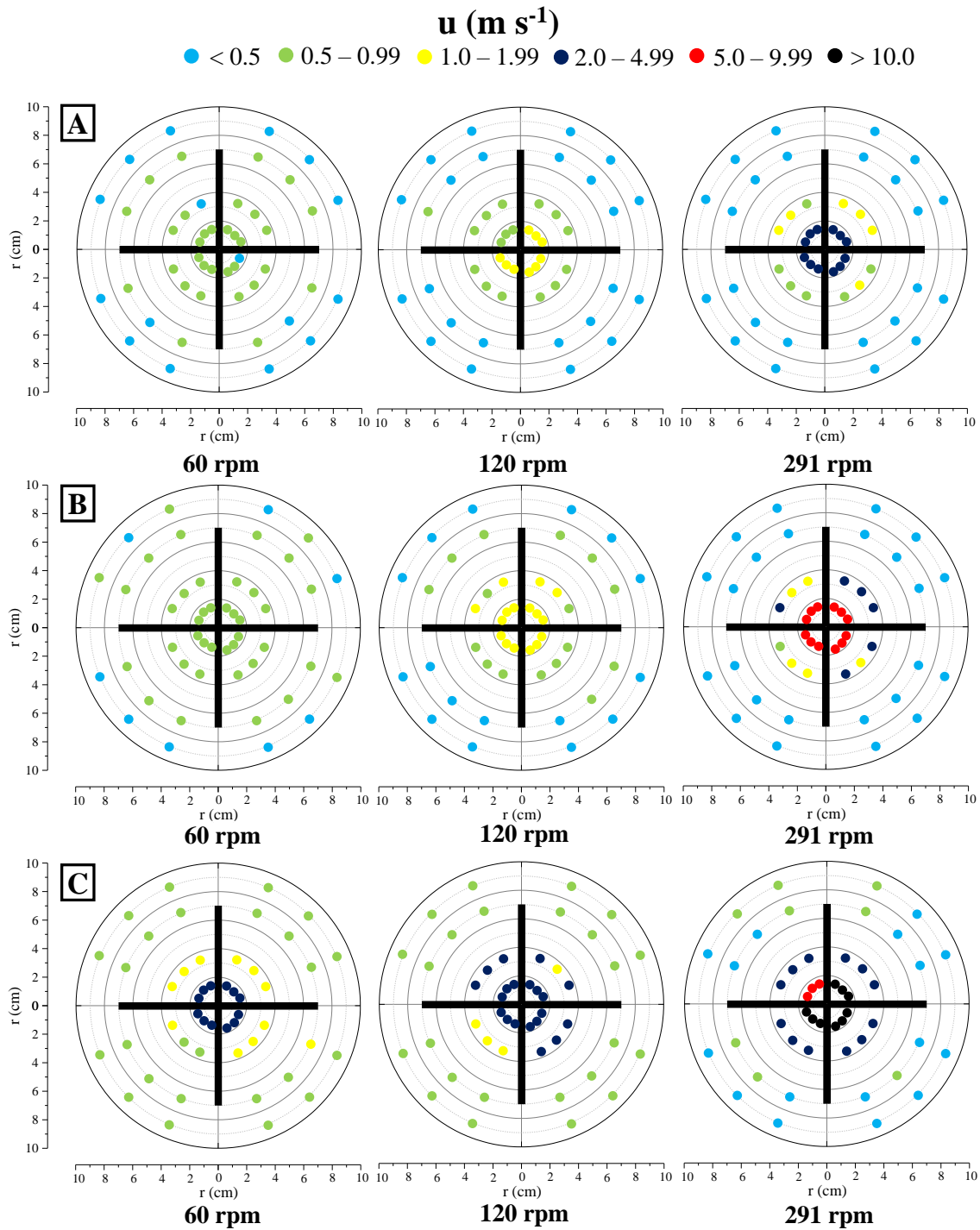
O aumento da velocidade de rotação proporciona um movimento das partículas para longe do canal de “jato mecânico” e próximo à parede. Assim, forma-se uma região de baixa porosidade no centro do leito pela qual escoava uma maior vazão de ar, conhecido como “jato mecânico” (NÉMETH et al., 1983; SZENTMARJAY; PALLAI, 1989). Próximo a parede é então formada uma região densa de partículas, que se assemelha as regiões anulares do leito de jorro convencional. Na interface entre o jorro mecânico e a camada densa, as partículas apresentam movimento helicoidal ascendente devido tanto à ação do agitador quanto à vazão do ar, enquanto a camada densa de partículas apresenta movimento descendente. Essas regiões de movimentação das partículas podem ser delimitadas em um perfil de velocidade do ar, como apresentado na Figura 4.9.

As regiões com maior densidade de partículas influenciam na movimentação das mesmas, e assim afetam diretamente o perfil de distribuição de velocidade, ou seja nas regiões com maior densidade de partículas a velocidade do ar é menor. O comportamento e as delimitações das regiões observadas na Figura 4.9 para 291 rpm são similares ao equipamento convencional (MATHUR; EPSTEIN, 1974). Esse resultado pode ser justificado pelo fato de que nessas condições de velocidade de rotação do agitador o canal preferencial no centro do leito já atingiu sua geometria máxima, possuindo as três regiões bem delimitadas. Para demais rotações (60 e 120 rpm) quase não se observa variação da velocidade do ar, com exceção de uma leve redução próximo à parede do equipamento. Isso promove um leito homogêneo, podendo ser justificado pela porosidade de forma análoga em grande parte do leito de partículas.

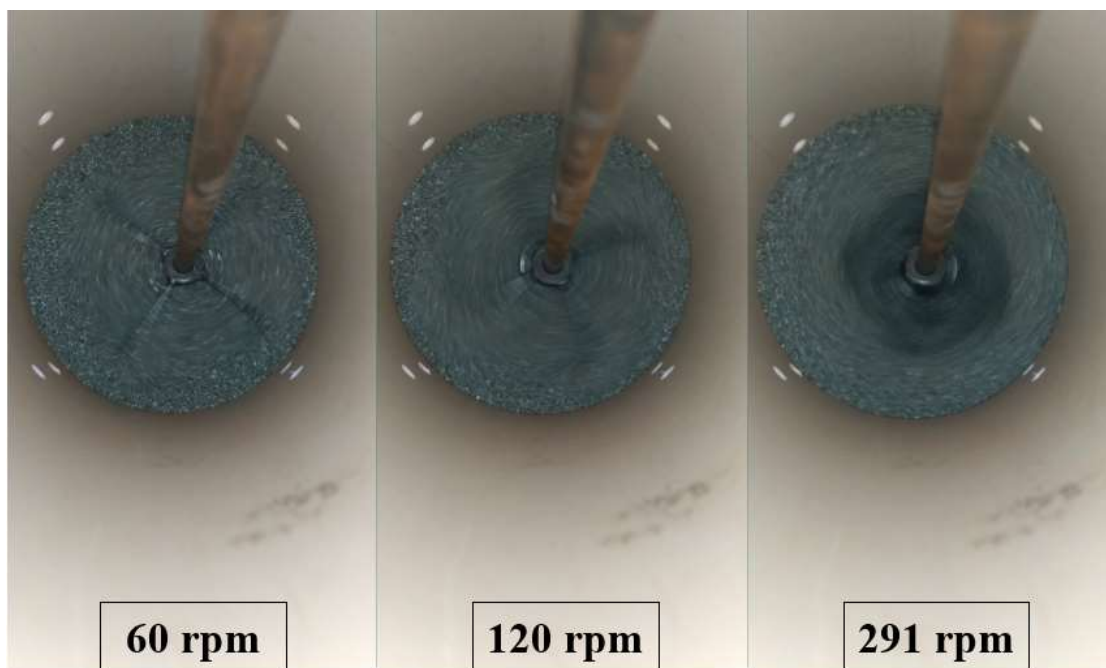
Desta forma, a definição das três regiões distintas (jorro, fonte e anular) características do leito de jorro convencional é condicionada pela rotação dos agitadores e pela vazão de ar. Para velocidades de rotação moderadas (<198 rpm) e vazões de ar maiores que a  $Q_{al}$ , um alto grau de movimento de partículas no leito é observado sem a definição das três regiões características. Caso contrário, tais regiões são observadas para altas velocidades de rotação. Apesar desses resultados, o uso do agitador melhora a estabilidade do processo, pois não há problemas relacionados ao colapso, que é uma desvantagem relevante para operações no leito de jorro convencional. Portanto, o uso do

agitador promove uma agitação das partículas no leito, mesmo em baixas velocidades de rotação.

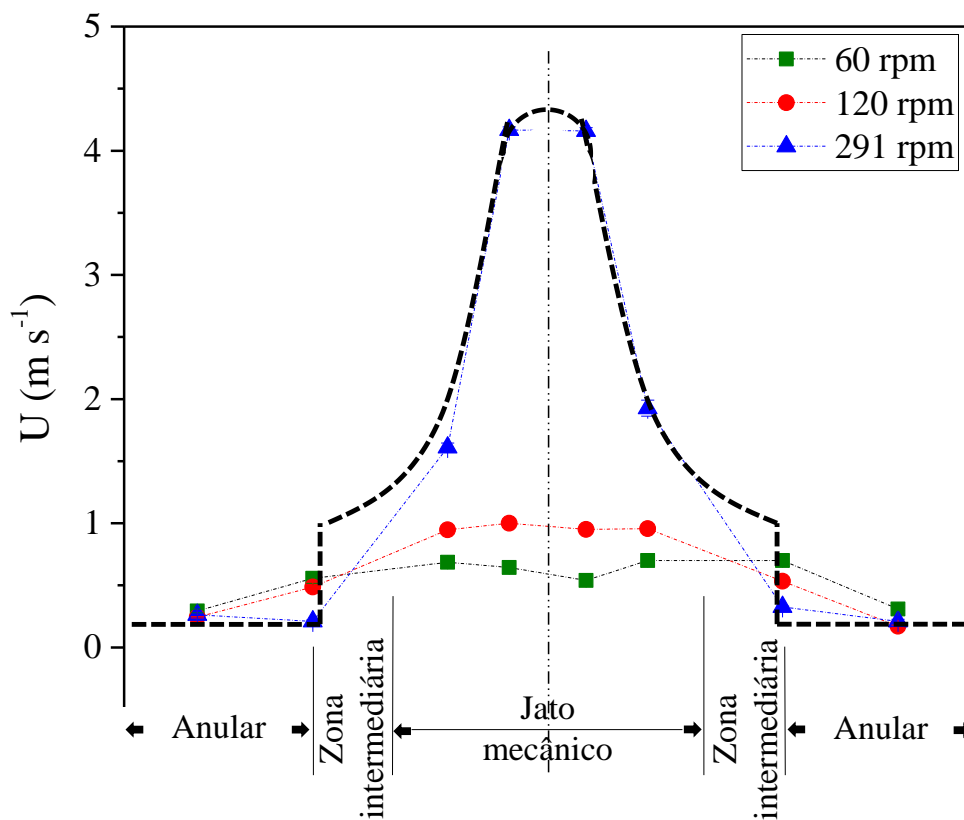
**Figura 4.7** – Mapa de velocidade do ar na secção transversal do leito de jorro com agitador mecânico de pás-retas. Dados: Partículas de vidro de 3 kg e 2,2 mm (ensaio E2). Vazão de ar de  $0,55 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$  (A);  $0,88 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$  (B);  $1,41 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$  (C). Desvio padrão menor do que 10% para 98% das medias obtidas.



**Figura 4.8** – Foto do interior do leito de jorro com agitador mecânico para diferentes velocidades de rotação do agitador de pás-retas.



**Figura 4.9** – Perfil de velocidade do ar com as regiões de movimentação das partículas para o agitador de pás-retas. Dados: Partículas de vidro de 3 kg e 2,2 mm (ensaio E2).



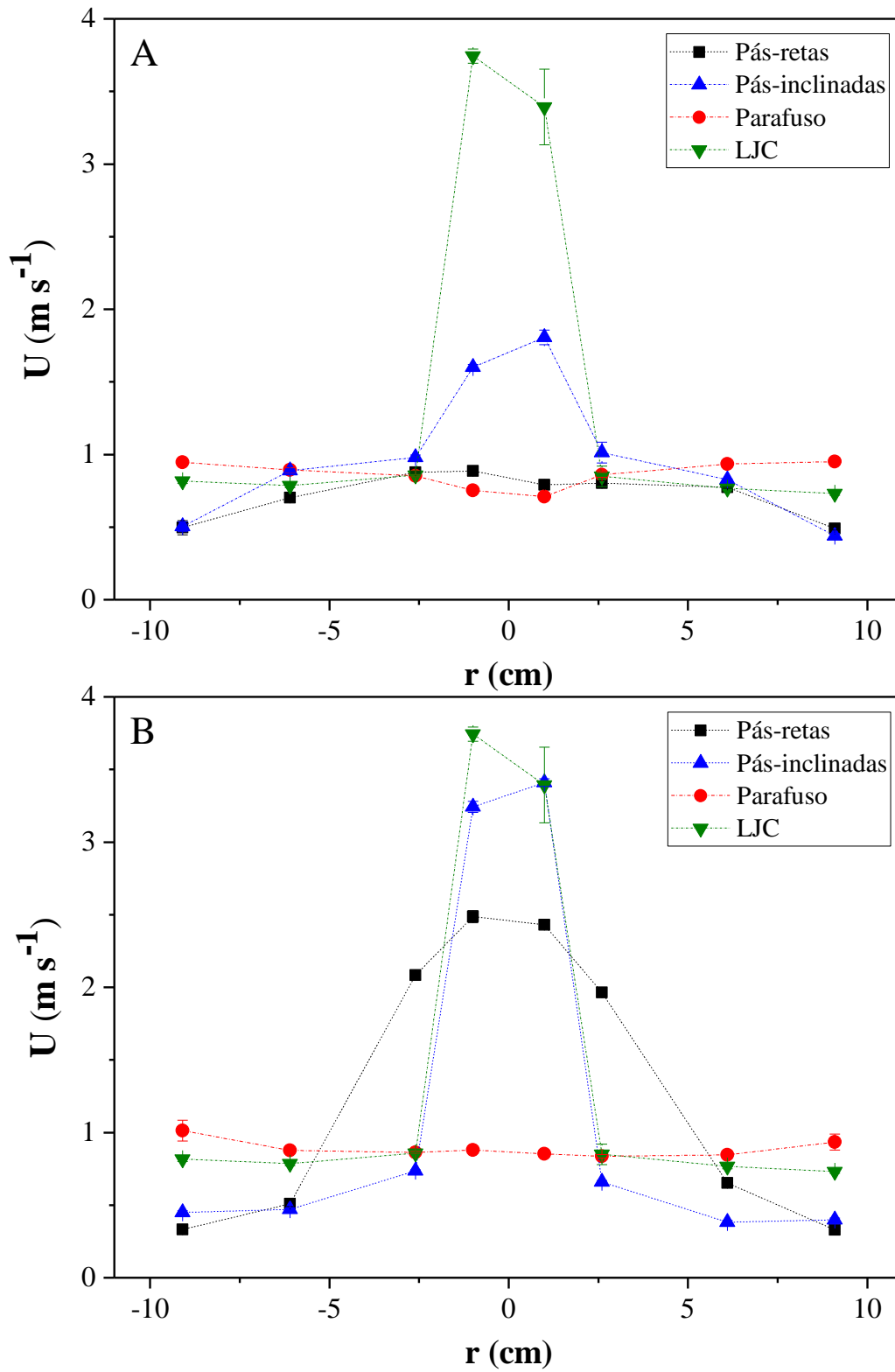
Essas regiões de movimentação das partículas, obtidas em altas velocidades de rotação, como observado na (Figura 4.9), também podem ser semelhantes para o agitador de pás-inclinadas, entretanto para o agitador tipo parafuso esse comportamento não é verificado. Tal resultado é apresentado na Figura 4.10 para o perfil de distribuição da velocidade do ar em diferentes configurações do agitador.

O comportamento do equipamento convencional observado na Figura 4.10 já é conhecido na literatura, apresentando baixa velocidade do ar na região anular e um pico no centro do leito devido a região do jorro e fonte (MAMURO; HATTORI, 1968; MATHUR; EPSTEIN, 1974). Os agitadores de pás-retas e de parafuso apresentam perfis achatados de velocidade do ar (Figura 4.10-A). Sendo que o resultado para pás-retas já foi discutido anteriormente, enquanto o de parafuso é consistente com os dados da literatura (SZENTMARJAY; PALLAI, 1989).

O perfil obtido para o agitador de pás-inclinadas para 60 rpm foi mais heterogêneo do que o de pás-retas, apresentando um pico no centro do leito (Figura 4.10-A). Esse resultado pode ser devido ao efeito da inclinação das pás, a qual favorece a formação e alargamento do canal do jorro mecânico mesmo em baixas velocidades de rotação. Esse efeito de alargamento já foi comentado anteriormente, sendo afetado diretamente pela velocidade de rotação e agora pode-se concluir que é influenciado também pela geometria do agitador utilizado. Desta forma, nota-se que o agitador de pás-inclinadas melhora a movimentação das partículas, já que necessita de uma menor velocidade de rotação para forçar as partículas ao movimento helicoidal, reduzindo a porosidade no centro do leito e assim formando o canal preferencial. Para a Figura 4.10-B (120 rpm) o agitador de pás-inclinadas apresenta um comportamento de distribuição e valores similares ao equipamento convencional. Esse resultado está ligado ao efeito de alargamento do canal do jorro devido ao efeito da velocidade de rotação.

Apesar da semelhança nos dados obtidos para pás-inclinadas e o LJC, na região anular uma pequena redução da velocidade do ar é notada (Figura 4.10-B). Esse fato pode ser atribuído à baixa movimentação das partículas próximo a parede, onde não há contato direto com o agitador, dificultando assim o escoamento de ar. Para pás-retas, nota-se uma menor velocidade do ar no centro do leito em comparação com o agitador de pás-inclinadas e o equipamento convencional, entretanto esse perfil se altera na região anular, sendo mais próximo do agitador de pás-inclinadas.

**Figura 4.10** – Velocidade do ar em função do raio do leito de jorro convencional e com agitação mecânica. Velocidade de rotação de 60 rpm (A); 120 rpm (B). Dados: Partículas de vidro de 3 kg, 2,2 mm e  $Q = 0,88 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .



Mesmo com maiores velocidades de rotação do agitador tipo parafuso, este não apresentou alteração no perfil de velocidade do ar, entretanto quando comparado com outros agitadores, notou-se um pequeno aumento da velocidade do ar próximo à parede do equipamento (Figura 4.10-A e B). Outros autores utilizaram o agitador tipo parafuso e observaram que o aumento da velocidade de rotação altera o perfil de velocidade no leito somente até 400 rpm, para maiores rotações o efeito da velocidade ao longo do raio é constante (SZENTMARJAY; SZALAY; PALLAI, 1992).

Os resultados discutidos anteriormente para o perfil de velocidade mostraram que tanto a velocidade de rotação quanto o tipo de agitador influenciam nesse perfil e também no efeito de alargamento do canal do jato mecânico. Além desse resultado, notou-se que o agitador de pás-inclinadas necessita de uma menor velocidade de rotação para iniciar o processo de alargamento do canal e assim aumentar o escoamento do ar no centro do leito. Esse fato indica que o agitador de pás-inclinadas necessita de uma menor demanda de energia para mesma operação. Esses resultados contribuem para uma análise do comportamento do leito e entre o contato entre as fases, mas ainda falta comparar essas configurações em diferentes velocidades de rotação e grupos de partículas, para poder indicar qual geometria é melhor para cada condição. Desta forma, na próxima seção será analisado um parâmetro adimensional (Redução Relativa da vazão de ar) que possibilita a comparação dos agitadores com o equipamento convencional em diferentes condições operacionais.

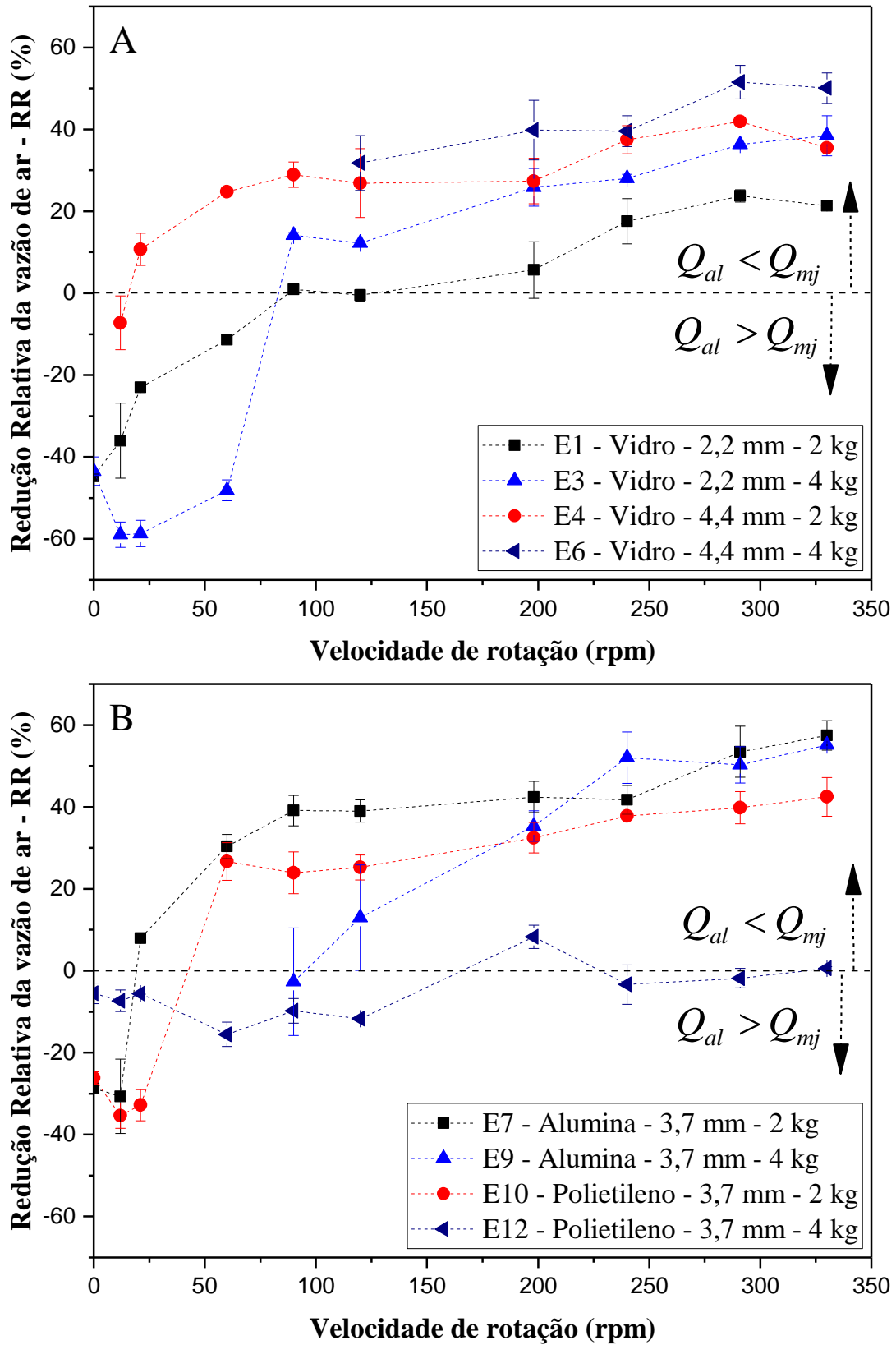
### **4.3 Redução Relativa da vazão de ar e propriedades das partículas**

Com os resultados apresentados anteriormente, ficou evidente que existem diferenças entre o leito de jorro com e sem agitação mecânica, tanto para a curva fluidodinâmica, quanto para o perfil de velocidade do ar. Apesar disso, um dos parâmetros de interesse para projetos e aplicações industriais é a capacidade da redução da vazão de ar devido a inserção do agitador dentro do leito. Desta forma, pode-se utilizar o adimensional da redução relativa (RR), sendo calculada pela Equação 3.6. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.11 para RR em função da velocidade de rotação para o agitador de pás-retas.

Conforme observado na Figura 4.11-A, os valores positivos da RR (%) representados acima da linha pontilhada, indicam que as vazões de ar para o leito de jorro com agitador mecânico são menores do que no equipamento convencional ( $Q_{al} < Q_{mj}$ ).



**Figura 4.11** – Redução relativa da vazão de ar (RR) em função da velocidade de rotação para o agitador de pás-retas. Ensaios E1, E3, E4 e E6 (A); E7, E9, E10 e E12 (B).



Nota-se que na Figura 4.11-A, que para baixas rotações, os valores da RR são negativos, indicando que utilizar o equipamento com agitação não é aconselhável nessas condições. Resultados semelhantes também foram observados por Reyes e Vidal (2000), que obtiveram maiores valores de “vazão de mínimo pseudo-fluidização” para o leito de jorro mecânico do que a configuração convencional, quando são empregadas baixas rotações.

Próximo a 90 rpm, os valores já se tornam similares ( $Q_{al} = Q_{mj}$ ) e com posterior aumento da velocidade de rotação, os valores da RR são todos positivos ( $Q_{al} < Q_{mj}$ ). O aumento da RR ocorre em função do aumento da velocidade de rotação, entretanto não há influência significativa desse parâmetro na RR (%) para rotações acima de 291 rpm (Figura 4.11-A) e 240 rpm (Figura 4.11-B), sugerindo uma condição estável. Esse resultado já foi discutido anteriormente, justificado devido ao efeito de alargamento do canal do jato mecânico. Desta forma, sugere-se que esse regime estável também está atrelado aos diferentes grupos de partículas. Apesar desse resultado, nota-se que para o ensaio E12 não foi verificada melhora com o aumento da rotação do agitador, sendo justificado devido à altura do leito estático. Nesse ensaio também foram verificadas instabilidades e um fenômeno mencionado anteriormente como leito borbulhante.

Quando comparados os diferentes ensaios da Figura 4.11-A, nota-se que o menor valor da RR foi para o ensaio E1 que corresponde à condição de menor massa de inerte (2kg) e menor diâmetro da partícula (2,2 mm). Para mesma massa de partículas e o dobro do diâmetro (ensaio E4 – 4,4 mm), nota-se melhores valores da RR para todas as rotações do agitador, sendo essa diferença próxima de 20% entre os ensaios.

Quando comparados os ensaios E1 e E3, nota-se que o aumento da massa de inerte favorece um maior valor de RR, indicando que o LJAM tem maior vantagem sobre o convencional para processos com maior massa de inerte (consequentemente maior altura do leito estático). Além do mais, no LJC existem limites operacionais em relação à altura do leito que podem alterar o regime hidrodinâmico do leito, como discutido no item 2.1.3.

Nesse sentido, à medida que a carga das partículas aumenta, maiores valores de RR (%) são obtidos, sugerindo uma melhor utilização do agitador para maiores quantidades de partículas de vidro, favorecendo a maior eficiência do agitador. Um efeito combinado com o diâmetro da partícula também pode ser observado, uma vez que o maior valor da RR foi para o ensaio E6 (3kg e 4,4mm), próximo de 50%. Na Figura 4.11-B tal tendência não é observada para partículas de alumina e polietileno, podendo ser justificado pela interação do efeito da densidade sobre os demais parâmetros do processo.

Os resultados apresentados, sugerem uma influência direta da velocidade de rotação, além disso tanto a massa do leito quanto o tipo de partícula sólida constituem parâmetros-chave para um projeto adequado do agitador, sendo fundamentais em sua eficácia e viabilidade. Além desses fatores o efeito da geometria do agitador também foi investigado, e está apresentado na Figura 4.12.

Para os agitadores de pás-retas e os de pás-inclinadas, nota-se que o aumento da velocidade de rotação provocou um aumento da redução relativa, sendo justificado pela maior movimentação das partículas no leito. Para velocidade de rotação de 21 rpm, observa-se que o agitador de pás-inclinadas atinge uma redução relativa nula (0%), como mostra a Figura 4.12-A. Em comparação com esse agitador, o de pás-retas somente atingiu a mesma redução relativa com 90 e 120 rpm, enquanto que o agitador parafuso obteve valores inferiores (-35%). Esses resultados sugerem que o agitador de pás-inclinadas é uma melhor opção para movimentar essas partículas no leito, necessitando menor energia mecânica para movimentar as partículas e reduzir a vazão de ar.

Com o aumento da velocidade de rotação, dois resultados principais podem ser observados: um valor de RR constante pode ser obtido próximo de 240 rpm, reduzindo dessa forma a influência da rotação. Esse resultado já foi apresentado anteriormente, sendo que o regime estável da RR é causado pelo efeito de alargamento máximo no canal do jato mecânico. Nesse caso, o mesmo fenômeno acontece no agitador de pás-inclinadas, sendo uma característica própria desse tipo de agitador em formato de pás. A segunda observação é que próximo de 240 rpm não foi observado diferença significativa nos resultados da RR para os agitadores de pás-retas e pás-inclinadas. Esse resultado é importante, indicando que a influência da inclinação das pás é minimizada com o aumento da velocidade de rotação. Tal processo já foi explicado no item 4.1 para a curva fluidodinâmica. Apesar disso, um resultado diferente foi encontrado para carga de 4kg (Figura 4.12-B), prevalecendo melhores resultados para o agitador de pás-inclinadas, mesmo para 330 rpm. Dessa forma, os melhores valores da RR para o agitador de pás-retas, pás-inclinadas e parafuso são: 24, 28 e -34% para 2kg e 38, 53 e -18% para 4kg, respectivamente.

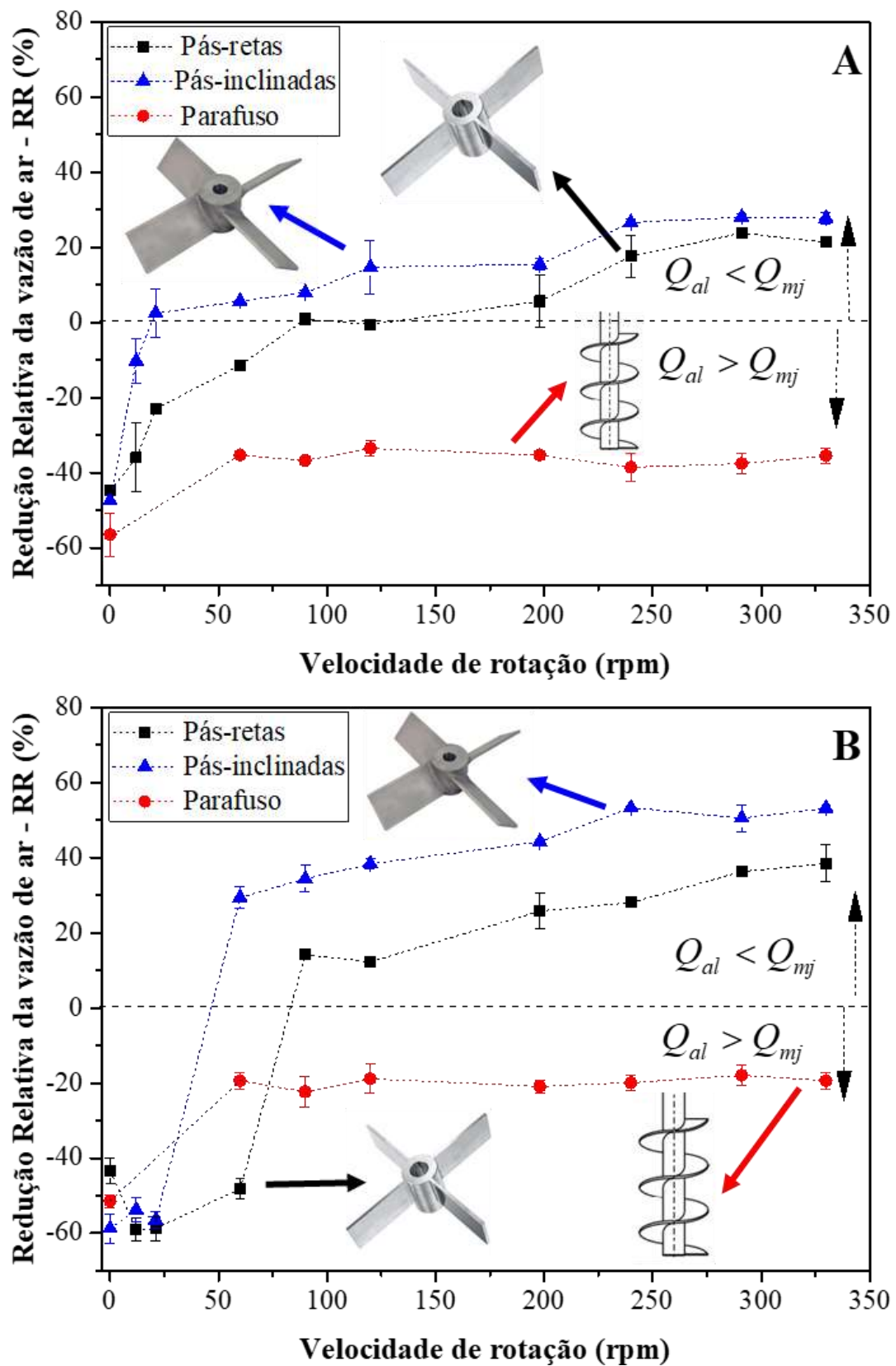
Os resultados da RR para o agitador tipo parafuso foram inferiores aos outros agitadores, além de não apresentar efeito em função da velocidade de rotação. Esse resultado pode ser devido ao método de determinação da vazão de ar necessária para agitar o leito ( $Q_{al}^3$ ), como indicado anteriormente pela Figura 4.5 e 4.6. Apesar desse método se basear na fluidodinâmica e em algumas considerações da literatura, acredita-

se que é possível utilizar uma vazão de ar igual ou até menor quando comparado com o LJC. Em contrapartida, estudos já demonstraram que nas mesmas condições operacionais de secagem, não há diferença entre operar com o LJC e o LJM em termos dos parâmetros cinéticos (BRITO et al., 2018). Entretanto, para o consumo energético específico, esses autores observaram que o LJM apresentou uma redução de 10%, mesmo com alguns problemas operacionais como aglomeração e a formação de zonas mortas (BRITO et al., 2018; SOUSA et al., 2019). Esses problemas ocorreram próximo a parede do equipamento, sendo causado devido ao diâmetro do agitador ser significativamente inferior ao diâmetro do cilindro do leito. Esse resultado desfavorável poderia ser evitado utilizando agitadores com diâmetro suficiente para “raspar” a parede do equipamento, aumentando a região de movimentação direta das partículas, como é o caso do agitador de pás-retas e pás-inclinadas utilizadas nesse estudo.

Apesar dos resultados negativos apresentados na Figura 4.12 para o parafuso, um comportamento diferente é esperado para outros grupos de partículas. Uma vez que o aumento da dificuldade de movimentar as partículas pode prevalecer um melhor desempenho do agitador tipo parafuso sobre o equipamento convencional. Sendo assim, na Tabela 4.3 são apresentados os dados dos parâmetros fluidodinâmicos e da RR para os ensaios E2, E5, E8, E11 e E14 realizados com a mesma massa de partícula e velocidade de rotação dos agitadores. A análise estatística ANOVA seguida do teste de Tukey foi realizada para comparar diferentes configurações do equipamento para o mesmo conjunto de dados, sendo representando pelas letras minúsculas na Tabela 4.3. Enquanto as letras maiúsculas representam o que foi analisado para diferentes grupos de partículas, usando uma mesma configuração do equipamento.

Para o agitador tipo parafuso, observa-se na Tabela 4.3 que o ensaio E2 apresentou valor negativo de -18% para a RR, entretanto os ensaios E5 e E8 tiveram valores positivos em torno de 20%. Já para aos demais ensaios, foram obtidos valores próximos a zero (E11 e E14). Esse resultado sugere que o agitador tipo parafuso tem um melhor desempenho com partículas de vidro de 4,4 mm com 3 kg (E5) e alumina de 3,7 mm com 3 kg (E8). Apesar desse resultado, para as partículas de polietileno (E11 e E14) ainda é vantajoso utilizar o equipamento com agitação mecânica no intuito de evitar instabilidades no leito e reduzir os picos de pressão (BARROS et al., 2020; NÉMETH; PALLAI; ARADI, 1983; REYES; VIDAL, 2000).

**Figura 4.12** – Redução Relativa da vazão de ar (RR) em função da velocidade de rotação do agitador para diferentes configurações dos agitadores. Dados: partículas de vidro 2,2 mm: (A) 2 kg (ensaio E1) e (B) 4 kg (ensaio E3).



**Tabela 4.3** – Parâmetros fluidodinâmicos para diferentes agitadores. Dados: Massa de partículas de 3 kg e velocidade de rotação de 240 rpm.

	<b>Agitador</b>	<b><math>u_{al}</math> (m s<sup>-1</sup>)</b>	<b><math>\Delta P_{al}</math> (Pa)</b>	<b><math>\Delta P_{max}</math> (Pa)</b>	<b>RR (%)</b>
<b>E2</b>	LJC*	21,8±0,5 <sup>bC**</sup>	1140,0±10,0 <sup>cbD</sup>	3200,0±60,0 <sup>aB</sup>	---
	Pás-retas	14,8±0,3 <sup>CB</sup>	1090,0±60,0 <sup>CB</sup>	1400,0±200,0 <sup>bB</sup>	32,0±1,0 <sup>BB</sup>
	Pás-inclinadas	13,0±1,0 <sup>cC</sup>	900,0±7,0 <sup>aB</sup>	1260,0±40,0 <sup>bA</sup>	40,0±5,0 <sup>bA</sup>
	Parafuso	26,0±1,0 <sup>aB</sup>	1220,0±60,0 <sup>bBA</sup>	1220,0±60,0 <sup>bBA</sup>	-18,0±6,0 <sup>aC</sup>
<b>E5</b>	LJC	42,0±1,0 <sup>aA</sup>	1150,0±10,0 <sup>abD</sup>	3150,0±20,0 <sup>aB</sup>	---
	Pás-retas	23,0±1,0 <sup>cC</sup>	1190,0±20,0 <sup>aB</sup>	1280,0±30,0 <sup>bB</sup>	46,0±3,0 <sup>BB</sup>
	Pás-inclinadas	19,0±1,0 <sup>cA</sup>	1010,0±30,0 <sup>cA</sup>	1160,0±20,0 <sup>cB</sup>	54,0±3,0 <sup>BB</sup>
	Parafuso	33,0±4,0 <sup>bBA</sup>	1090,0±50,0 <sup>cbCB</sup>	1090,0±50,0 <sup>cCB</sup>	22,0±8,0 <sup>aA</sup>
<b>E8</b>	LJC	37,5±0,1 <sup>aB</sup>	940,0±8,0 <sup>cA</sup>	2480,0±10,0 <sup>aA</sup>	---
	Pás-retas	21,0±4,0 <sup>bcC</sup>	1080,0±60,0 <sup>aB</sup>	1110,0±40,0 <sup>bB</sup>	44,0±8,0 <sup>abB</sup>
	Pás-inclinadas	16,0±1,0 <sup>CB</sup>	680,0±20,0 <sup>bC</sup>	800,0±30,0 <sup>dD</sup>	58,0±2,0 <sup>aCB</sup>
	Parafuso	27,0±4,0 <sup>bBA</sup>	910,0±40,0 <sup>cC</sup>	910,0±40,0 <sup>cC</sup>	27,0±8,0 <sup>bA</sup>
<b>E11</b>	LJC	31,8±0,1 <sup>cD</sup>	680,0±7,0 <sup>aB</sup>	2170,0±40,0 <sup>aC</sup>	---
	Pás-retas	20,0±2,0 <sup>aCB</sup>	950,0±40,0 <sup>cA</sup>	2600,0±60,0 <sup>bB</sup>	37,0±6,0 <sup>BB</sup>
	Pás-inclinadas	11,8±0,3 <sup>bC</sup>	520,0±20,0 <sup>bD</sup>	740,0±30,0 <sup>dD</sup>	62,9±0,7 <sup>aC</sup>
	Parafuso	33,0±0,4 <sup>cA</sup>	900,0±20,0 <sup>cC</sup>	900,0±20,0 <sup>cC</sup>	-4,0±1,0 <sup>cCB</sup>
<b>E14</b>	LJC	33,0±1,0 <sup>cD</sup>	540,0±10,0 <sup>cC</sup>	2100,0±200,0 <sup>cC</sup>	---
	Pás-retas	29,0±2,0 <sup>aA</sup>	900,0±60,0 <sup>bA</sup>	2600,0±300,0 <sup>cA</sup>	14,0±5,0 <sup>bA</sup>
	Pás-inclinadas	11,4±0,2 <sup>bC</sup>	490,0±3,0 <sup>cD</sup>	660,0±20,0 <sup>bC</sup>	65,8±0,5 <sup>aC</sup>
	Parafuso	32,9±0,9 <sup>cBA</sup>	1400,0±200,0 <sup>aA</sup>	1400,0±200,0 <sup>aA</sup>	1,0±2,0 <sup>cB</sup>

\* Para o leito de jorro convencional foram utilizados os dados referentes a  $u_{mj}$  e  $\Delta P_j$ .

\*\*Médias seguidas por uma letra diferente em uma determinada coluna são significativamente diferentes em  $p < 0,05$  (teste de Tukey). Equipamento diferente, mas para o mesmo ensaio (Letras minúsculas). Mesmo equipamento, mas com diferentes ensaios (Letras maiúsculas).

Para o agitador de pás-inclinadas, o menor valor da RR foi para as partículas de vidro (E2) e o maior para partículas de polietileno cilíndricas (E14), obtendo aproximadamente 40 e 66%, respectivamente. A análise estatística mostrou que não há diferença significativa entre os ensaios E8, E11 e E14. Essa análise pode ser um indicativo que para o agitador de pás-inclinadas o efeito da densidade entre 1500 e 930 kg.m<sup>-3</sup> não afeta a RR para valores próximos ao diâmetro médio das partículas (3,7 e 3,8 mm). Para os ensaios E2 e E5, nota-se que um aumento próximo de 14% é alcançado para um aumento de 100% no diâmetro da partícula (2,2 para 4,4 mm). Além do mais, o maior

valor médio obtido para o ensaio E14 pode ser atribuído tanto pela propriedade das partículas (geometria cilíndricas), quanto pela maior altura do leito estático para as partículas de polietileno. Desta forma, esses resultados indicam que quanto maior a dificuldade em movimentar as partículas e manter o jorro estável, maior será o valor da velocidade de mínimo jorro ( $u_{mj}$ ) e conseqüentemente maior o valor da RR. Isso é uma vantagem para o LJAM, uma vez que a movimentação das partículas é dada predominantemente pelo agitador, necessitando de uma menor velocidade do ar, sem que ocorra o colapso do jorro como no equipamento convencional. Esse resultado pode ser confirmado pelos valores da  $u_{al}$  serem sempre inferiores ao  $u_{mj}$  em todas as condições para o agitador tipo pás-inclinadas e pás-retas.

Em relação à queda de pressão operacional, o agitador de pás-inclinadas apresentou os menores resultados para todos os grupos de partículas, sendo o menor valor para o ensaio E14, mas esse último foi a única exceção da análise estatística onde não apresentou diferença significativa com o LJC (Tabela 4.3). O menor valor da queda de pressão para esse agitador pode estar atrelado ao fato de que, nessa velocidade de rotação (240 rpm), as 3 regiões de movimentação das partículas já estão bem definidas, como discutido no item 4.3. Sendo assim, com o canal do jato mecânico bem delimitado o escoamento do ar ocorre mais facilmente por essa região, além da inclinação das pás auxiliar nesse processo e reduzir a resistência do agitador nessa etapa. Em compensação, o agitador de pás-retas mostrou ter maior resistência ao escoamento de ar, apresentando queda de pressão maior do que o de pás-inclinadas e do que o LJC, com exceção para os ensaios E2 e E5. Na análise para diferentes grupos de partículas, nota-se que para o agitador de pás-retas não houve diferença significativa entre os ensaios E2, E5 e E8. Esse resultado pode ser devido ao fato de que nessa rotação (240 rpm) o canal do jato mecânico está definido e o escoamento de ar nele não é afetado significativamente pelas propriedades das partículas, mas sim, principalmente, pela altura do leito. Esse fato é coerente devido à altura do leito para os ensaios E2, E5 e E8 serem relativamente próximas quando comparadas com os demais ensaios (E11 e E14), os quais também não apresentaram diferença significativa para a queda de pressão entre ambos os ensaios. Para os ensaios E11 e E14 não foram verificadas a formação das regiões de movimentação das partículas, devido à altura do leito ser elevada. Esse resultado foi verificado através de observações internas.

Para o agitador tipo parafuso a queda de pressão operacional não apresentou diferença significativa ou foi maior do que o equipamento convencional. Em relação às

demais configurações de agitadores, os resultados também não foram muito promissores. Esses resultados podem ser explicados devido ao fato desse tipo de agitador não apresentar um canal bem delimitado no centro, sendo o escoamento do ar realizado de forma tangencial ao próprio agitador. Outra possível explicação seria devido ao método de determinação, no qual a queda de pressão operacional é igual à queda de pressão máxima. Entretanto, para esse último parâmetro é possível comparar com as demais configurações e ensaios, obtendo-se melhores resultados.

O agitador tipo parafuso helicoidal apresentou queda de pressão máxima menor do que o LJC em todos os ensaios apresentados na Tabela 4.3. Em comparação com os ensaios realizados, observou-se maior valor da queda de pressão máxima para o ensaio E14. Nesse ensaio foi verificado instabilidade com o agitador tipo parafuso, apresentando regime borbulhante, o qual aumenta o erro experimental, como pode ser observado na Tabela 4.3. Em relação ao agitador de pás-inclinadas, a queda de pressão máxima foi menor em todos os grupos de partículas em comparação com o de pás-retas e convencional. Sendo esse um resultado já esperado, uma vez que as pás com alguma inclinação auxiliam no movimento ascendente das partículas do leito e reduz a queda de pressão máxima.

De modo geral, a adição do agitador no leito proporcionou uma melhora no processo em todas as condições analisadas. Apesar das propriedades das partículas terem efeito sobre o parâmetro da RR, na velocidade de rotação de 240 rpm seus efeitos são minimizados. O agitador que apresentou o melhor desempenho foi o de pás-inclinadas e o pior foi o parafuso helicoidal. Para o agitador de pás-retas, principalmente para o ensaio E14 onde obteve-se o pior resultado da RR, esse pode ser tanto devido instabilidade do leito quanto ao movimento direto das partículas (contato com as pás) ser promovido somente na parte cônica. Nas demais regiões do leito (região cilíndrica), a movimentação das partículas é dada pelo movimento global do leito (contato indireto). Para o agitador de pás-inclinadas, esse fenômeno foi minimizado devido à inclinação das pás, a qual auxilia na movimentação das partículas favorecendo a formação bem delimitada das regiões de movimentação das partículas, como já discutido anteriormente.

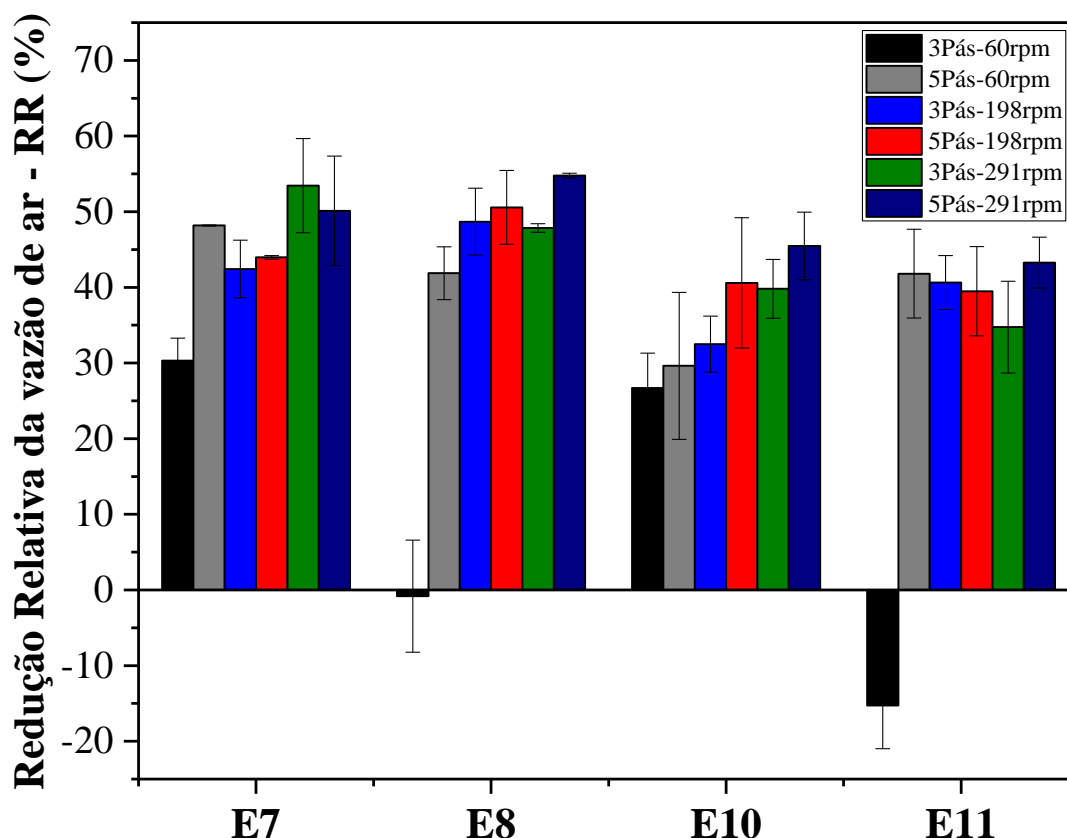
Tendo em vista essa desvantagem observada para esse tipo de agitador de pás-retas, foram adicionados novos conjuntos de pás na haste do agitador no intuito de melhorar a movimentação das partículas e melhorar o parâmetro de RR. Na secção seguinte serão abordados com detalhes esses resultados.



#### 4.4 Modificação do número e da distância entre as pás do agitador

Devido aos problemas no processo provocados pela elevada altura do leito, foi realizada uma alteração no LJAM no intuito de aumentar o número e a distância entre as pás no agitador, como já descrito no item 3.2. Essa modificação tem o intuito de reduzir a vazão de ar e melhorar a estabilidade do leito. Desta forma, foram adicionadas duas novas pás, com isso foi agitada também a parte cilíndrica do leito. Com isso, é possível aumentar a altura do leito agitado diretamente pelas pás do agitador. Esses experimentos foram realizados em diferentes velocidades de rotação com o agitador de pás-retas, para partículas de alumina (E7-E8) e polietileno (E10-E11), como mostra a Figura 4.13.

**Figura 4.13** – Redução relativa da vazão de ar para diferentes números de pás para o agitador de pás-retas. Dados: Alumina – 2 kg (E7) e 3 kg (E8) e Polietileno – 2 kg (E10) e 3 kg (E11).

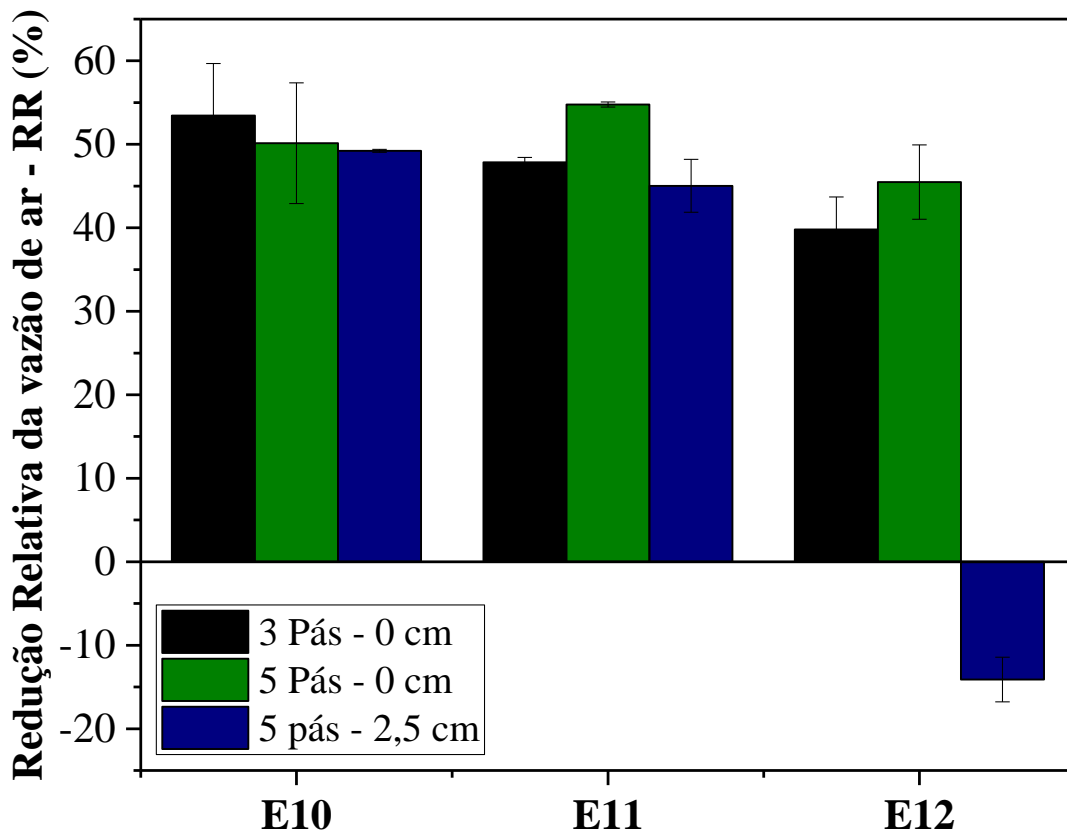


Observa-se que somente para velocidade de rotação de 60 rpm houve uma diferença significativa para os valores da RR. Esse resultado sugere que para maiores velocidades de rotação (198 e 291 rpm) o efeito do número de pás no agitador não é significativo. O aumento do número de pás de 3 para 5 teve resultados positivos com 60 rpm, mostrando uma diferença na RR de aproximadamente 18, 43, 3 e 57% para E7, E8,

E10 e E11, respectivamente. Isso significa que o aumento do número de pás possibilita obter menores vazões de ar empregando uma menor velocidade de rotação, reduzindo dessa forma o custo energético. Além do mais, observações internas do leito mostraram melhora na estabilidade do leito, evitando a formação do leito borbulhante com a utilização de 5 pás no agitador. Para queda de pressão no leito, houve melhora nos valores da  $\Delta P_{\max}$  para os ensaios com 60 rpm, entretanto para  $\Delta P_{al}$  foi verificado um aumento para o agitador com 5 pás. Esse resultado pode ser devido a maior resistência ao escoamento do ar oferecida pelas pás adicionadas.

Para os dados apresentados na Figura 4.14 a altura do agitador é de 9,5, 12,5 e 22,5 cm para as condições de 3 pás, 5 pás e 5 pás com espaçamento de 2,5 cm, respectivamente. Nota-se que para a última condição a altura do agitador mecânico é próxima da altura do leito de partículas ( $H_0=23,5\text{cm}$ ). Apesar do agitador na condição espaçada atingir de forma direta uma maior região da parte cilíndrica, os dados obtidos para o parâmetro da RR não atingiram os resultados esperados. Para os ensaios E10 e E11 não houve diferença entre a RR, enquanto para o E12 nota-se uma piora nos resultados.

**Figura 4.14** – Redução relativa da vazão de ar em função dos ensaios para diferentes espaçamentos das pás do agitador de pás-retas. Dados: Polietileno – 2 kg (E10), 3 kg (E11) e 4 kg (E12).

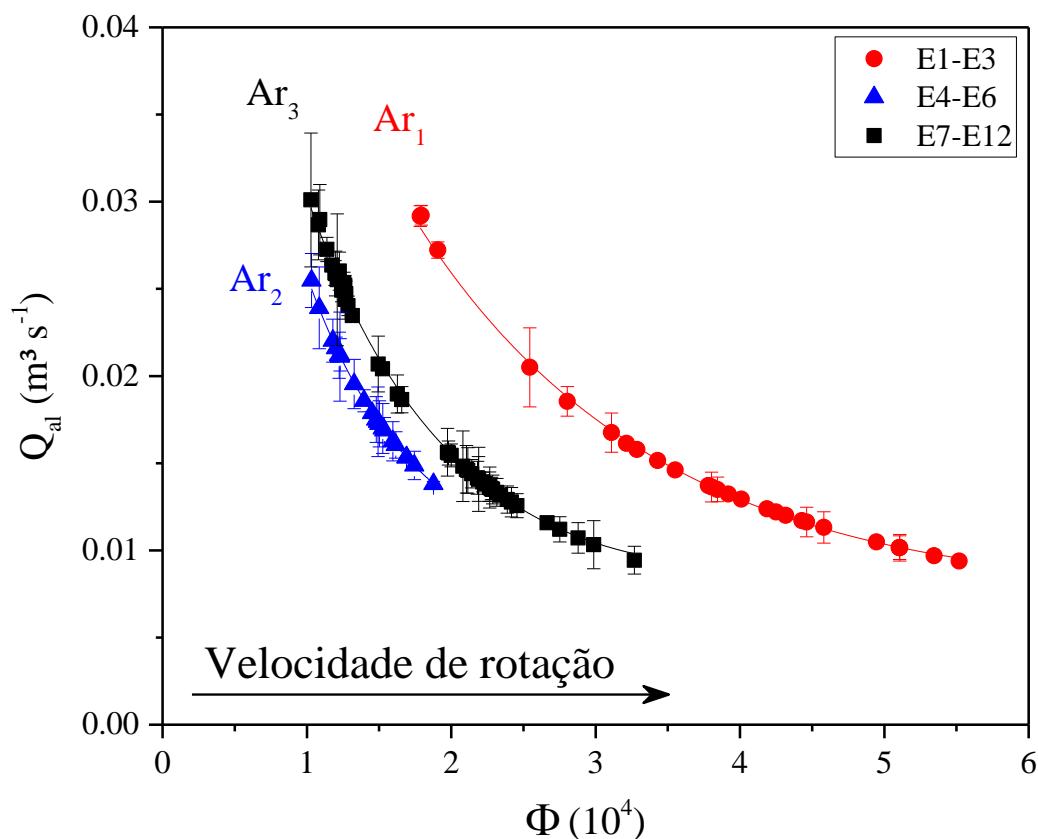


Caso o leito de partículas não estivesse sob o efeito de nenhuma vazão de ar, o agitador deveria fazer um esforço maior para movimentar as partículas, uma vez que as partículas do leito estão submetidas aos efeitos da gravidade. Entretanto, no processo apresentado na Figura 4.14, é utilizada uma vazão de ar suficiente para fluidizar parcialmente ou totalmente o leito. Sendo assim, as partículas não estão mais sob efeito apenas da ação da força da gravidade, reduzindo o esforço (torque) que o agitador deve fazer para movimentar estas mesmas partículas. Desta forma, se o agitador está disposto de forma espaçada no leito, ele deve movimentar uma maior área e um maior conjunto de partículas de forma direta, aumentando o torque necessário para o processo. O mesmo efeito existe quando empregado um maior número de pás do agitador. Esses fenômenos já foram mencionados em outros estudos, sendo que McCabe e Smith (1967) relataram que dois impelidores de pás-retas, dispostos no mesmo eixo, requerem mais potência que um impelidor sozinho. Battaglini (1998) menciona que a potência consumida é influenciada pela distância entre o impelidor e o fundo do tanque, espaçamento entre as pás em sistema com múltiplos impelidores e o número e a largura das pás.

#### **4.5 Ajuste dos dados à uma função**

Nas seções anteriores vimos que, além da geometria dos agitadores, as propriedades das partículas também afetam diretamente o comportamento das variáveis do processo. Além da fase sólida constituída pelas partículas, a fase fluida apresenta propriedades únicas que também podem alterar as condições do processo. Na seção 4.4 foram discutidos os efeitos do diâmetro e densidade das partículas, mas tentar incorporar as variáveis de ambas as fases é algo mais difícil. Entretanto, existem alguns números adimensionais que levam em consideração quase todas essas variáveis, podendo ajudar na discussão sobre seus efeitos no processo. Vários autores empregaram o número de Arquimedes para avaliar o efeito de partículas em leitos de jorro e fluidizados (FENG et al., 2017; HOSSEINI et al., 2019). Nesse caso, a influência da partícula é avaliada com base no gráfico da vazão de ar para agitar o leito em função da rotação do agitador representada por  $\phi$  (Equação 3.10), como apresentado na Figura 4.15 para o agitador de pás-retas.

**Figura 4.15** – Vazão de ar em função de  $\phi$  para diferentes condições operacionais (E1-E12) para o agitador de pás-retas. Dados: E1-E3 (Vidro – 2,2 mm), E4-E6 (Vidro – 4,4 mm), E7-E9 (Alumina – 3,7 mm) e E10-E12 (Polietileno – 3,7 mm).



Para as partículas avaliadas na Figura 4.15, a vazão ar de necessária para agitar o leito diminui exponencialmente à medida que a rotação do agitador aumenta. Este resultado sugere um impacto significativo no consumo total de energia, uma vez que se pode utilizar outros grupos de partículas para reduzir a vazão de ar na operação. Observa-se que existe uma relação exponencial entre o adimensional  $\phi$  com  $Q_{al}$  para os três grupos de partículas específicos. Essa relação é dada pelo número de Arquimedes ( $Ar$ ), sendo indicado pelos ensaios E1-E3 ( $Ar_1=877281$ ), E4-E6 ( $Ar_2=7018250$ ) e o terceiro grupo é referente aos ensaios E7-E12 ( $Ar_3=2503181-1601336$ ), representados pelas partículas de mesmo diâmetro.

As relações exponenciais apresentadas na Figura 4.15 tem uma inclinação similar, mas com diferentes posições que podem ser relacionadas com as características das partículas. Esse fato indica que existem inúmeras curvas para diferentes número de  $Ar$ . Desta forma, foi sugerida uma equação (Equação 4.3) geral que relaciona o número de  $Ar$  aos demais parâmetros. As constantes ( $a = -0,225$  e  $k = 3582$ ) foram obtidas ajustando-

se a função 4.3 aos dados experimentais e representam de forma satisfatória os dados experimentais ( $R^2 = 0,90$ ), com nível de significância de 95% ( $p < 0,05$ ).

$$Q_{al} = Ar^a \exp(-k \phi) \quad (4.3)$$

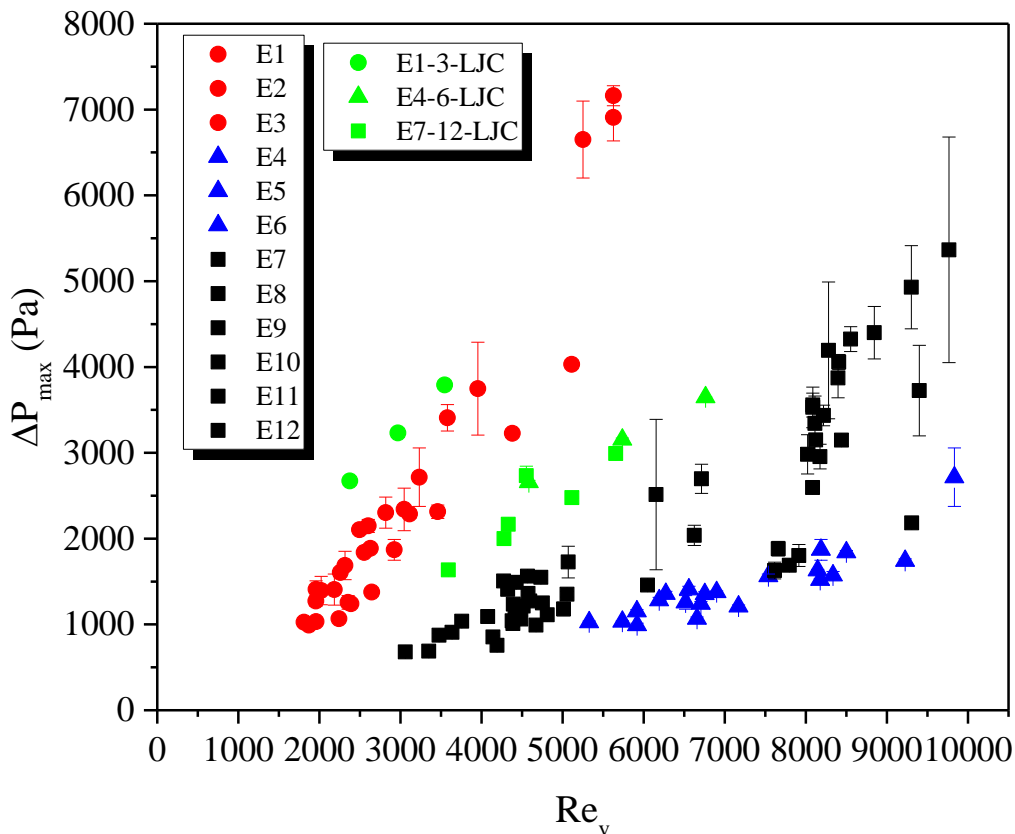
As partículas são afetadas de forma diferente pela presença do agitador no leito, sendo que partículas com menores diâmetros (mesma densidade –  $Ar_1$ ) tem uma resposta mais lenta ao aumento de  $\phi$ , ou seja, a  $Q_{al}$  para  $Ar_1$  é menos sensível a variação de  $\phi$ . Esse resultado pode estar relacionado com a menor força que deve ser fornecida para movimentar o leito, devido à combinação entre o diâmetro e a massa específica das partículas. Nos demais casos ( $Ar_2$  e  $Ar_3$ ) seria necessária uma maior movimentação no leito pelo agitador para promover uma mesma variação na  $Q_{al}$ , devido ao maior diâmetro e também à altura do leito estático.

Outro resultado importante a ser analisado é a posição da curva exponencial referentes a  $Ar_3$ , que fica entre as curvas de  $Ar_1$  e  $Ar_2$ . Esse resultado pode ser justificado devido ao diâmetro de  $Ar_3$  corresponder a um valor intermediário (3,7 mm), mesmo existindo uma diferença de densidade, uma vez que o número de Arquimedes depende mais do diâmetro da partícula, pois esse é elevado a uma potência de terceiro grau (Equação 3.11). Esse fato demonstra a importância do diâmetro frente à densidade, principalmente para a operação em LJAM onde o movimento das partículas é parcialmente ascendente (vazão de ar) e parcialmente tangencial (agitador). Esses resultados também são evidenciados pela sobreposição das curvas referentes às partículas de alumina e polietileno, representadas por  $Ar_2$ . Desta forma, em relação aos valores de  $Ar$ , pode-se supor que para o processo em LJAM o tamanho da partícula tem maior influência do que a densidade, inferindo diretamente na porosidade do leito e na permeabilidade do ar.

Devido à influência das características das partículas mencionadas anteriormente, verifica-se que esses fenômenos podem alterar tanto o movimento das partículas quanto o escoamento do ar dentro do leito e assim a queda de pressão. Na Figura 4.16 são apresentados os dados da queda de pressão máxima em função do  $Re_v$  para o LJAM. Observa-se que existe um comportamento característico para o mesmo número de Arquimedes. Para os ensaios E1-E3 ( $Ar_1$ ), todos os valores de  $\Delta P_{max}$  no gráfico foram inferiores aos obtidos para o LJC, com algumas exceções em baixas velocidades de rotação (E3-12, 21 e 60 rpm). Esse resultado pode ser devido a maior altura do leito

estático e também pela baixa movimentação do leito. Para as partículas dos ensaios E4-E6 ( $Ar_2$ ), todos os resultados são inferiores quando comparados com a queda de pressão máxima do LJC, além de apresentar menor erro experimental. Esses resultados comprovam um dos principais objetivos do LJAM, minimizar os picos de queda de pressão (NÉMETH; PALLAI; ARADI, 1983) e garantir um movimento estável do leito de jorro, como já discutido anteriormente. Para o grupo  $Ar_3$  verificou-se que o aumento da altura do leito favoreceu menores valores da queda de pressão para o LJC, fato esse devido a movimentação do leito pelo agitador ser predominante na base do leito (devido o número de pás). Esse resultado só fica favorável para o LJAM em rotações maior que 120 rpm para E9, E11 e E12.

**Figura 4.16** – Queda de pressão máxima do leito em função do número de Reynolds da vazão de ar ( $Re_v$ ) para o agitador de pás-retas.



As partículas referentes a  $Ar_1$  e  $Ar_2$  apresentam um perfil quase linear entre a  $\Delta P_{max}$  e  $Re_v$ . Mesmo com esse resultado, além do efeito da vazão de ar na queda de pressão, existe também a influência da velocidade de rotação do agitador, com exceção dos ensaios E4-E6 que tiveram pouca variação na  $\Delta P_{max}$ . Essa menor variação pode estar relacionada com o maior diâmetro e densidade desse grupo de partículas ( $Ar_2$ ). Para os

ensaios E7-E12 ( $Ar_3$ ) a influência da velocidade de rotação se torna mais significativa, bem como a vazão de ar pelo parâmetro  $Re_v$ . Esse resultado pode estar relacionado com a maior altura do leito e menor densidade, uma vez que estes apresentam o mesmo diâmetro. Apesar desse resultado, a influência desses parâmetros (densidade e altura do leito) podem levar a maiores erros experimentais, como ocorreu para os ensaios E9-90, 120 e 198 rpm.

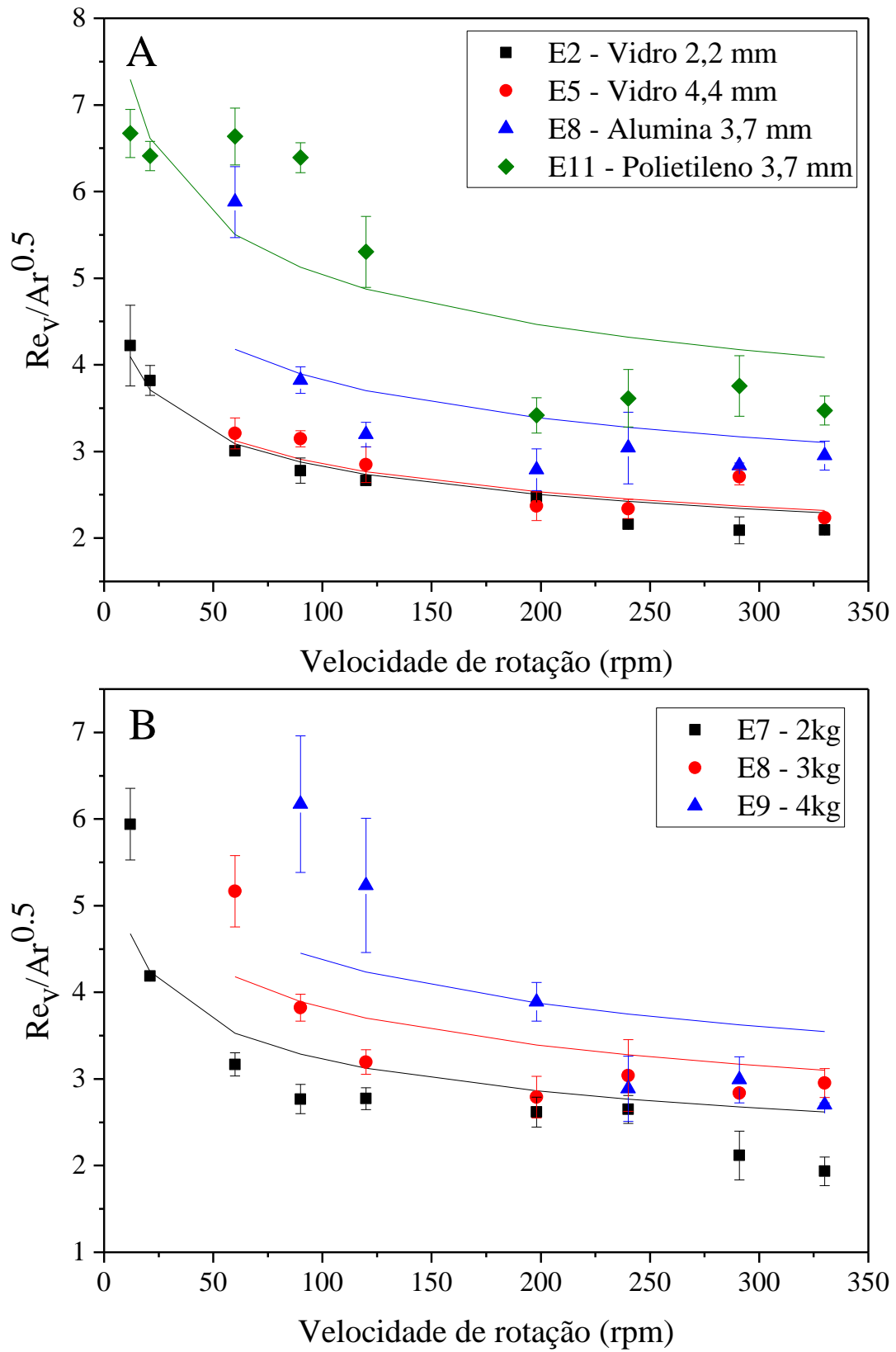
Os resultados apresentados nas Figuras 4.15 e 4.16 indicam que as variáveis do processo podem ser relacionadas com parâmetros específicos das propriedades das partículas. Desta forma, pode-se ajustar esses dados a funções matemáticas como já fizeram outros autores para o leito de jorro convencional (OLAZAR et al., 2004). Os modelos empíricos para prever a velocidade de ar necessária para agitar o leito, a queda de pressão máxima e a queda de pressão operacional levaram em consideração tanto o número de Arquimedes quanto a rotação do agitador. Devido à grande quantidade de dados para diferentes agitadores e grupos de partículas, os modelos foram ajustados para o agitador de pás-retas considerando os ensaios E1 a E12. As previsões do modelo são apresentadas nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19, e as respectivas correlações obtidas são apresentadas nas Equações 4.4, 4.5 e 4.6:

Conforme observado na Figura 4.17-A, as previsões do modelo obtidas para a velocidade mínima para agitar o leito estão em concordância com as medidas experimentais ( $R^2 = 0,92$  e  $\alpha = 0,05$ ). Desvios mais elevados são observados para partículas de alumina e polietileno, o que pode ser justificado considerando as alturas de leito estáticas utilizadas para essas partículas.

Conforme realizado por Reyes e Vidal (2000), a correlação obtida neste estudo é derivada de Tsvik et al. (1967), que foi originalmente proposta para um leito de jorro cônico sem agitação. Assim, as maiores alturas de leito estático utilizadas com partículas de alumina e polietileno podem ter proporcionado uma configuração cônico-cilíndrica contribuindo para um pior ajuste, pois a hidrodinâmica desta configuração é bem diferente da observada no leito de jorro cônico (BI et al., 1997; MATHUR; EPSTEIN, 1974). A Figura 4.17-B concorda com esta hipótese porque as diminuições na massa do leito para partículas de alumina proporcionaram um melhor ajuste.

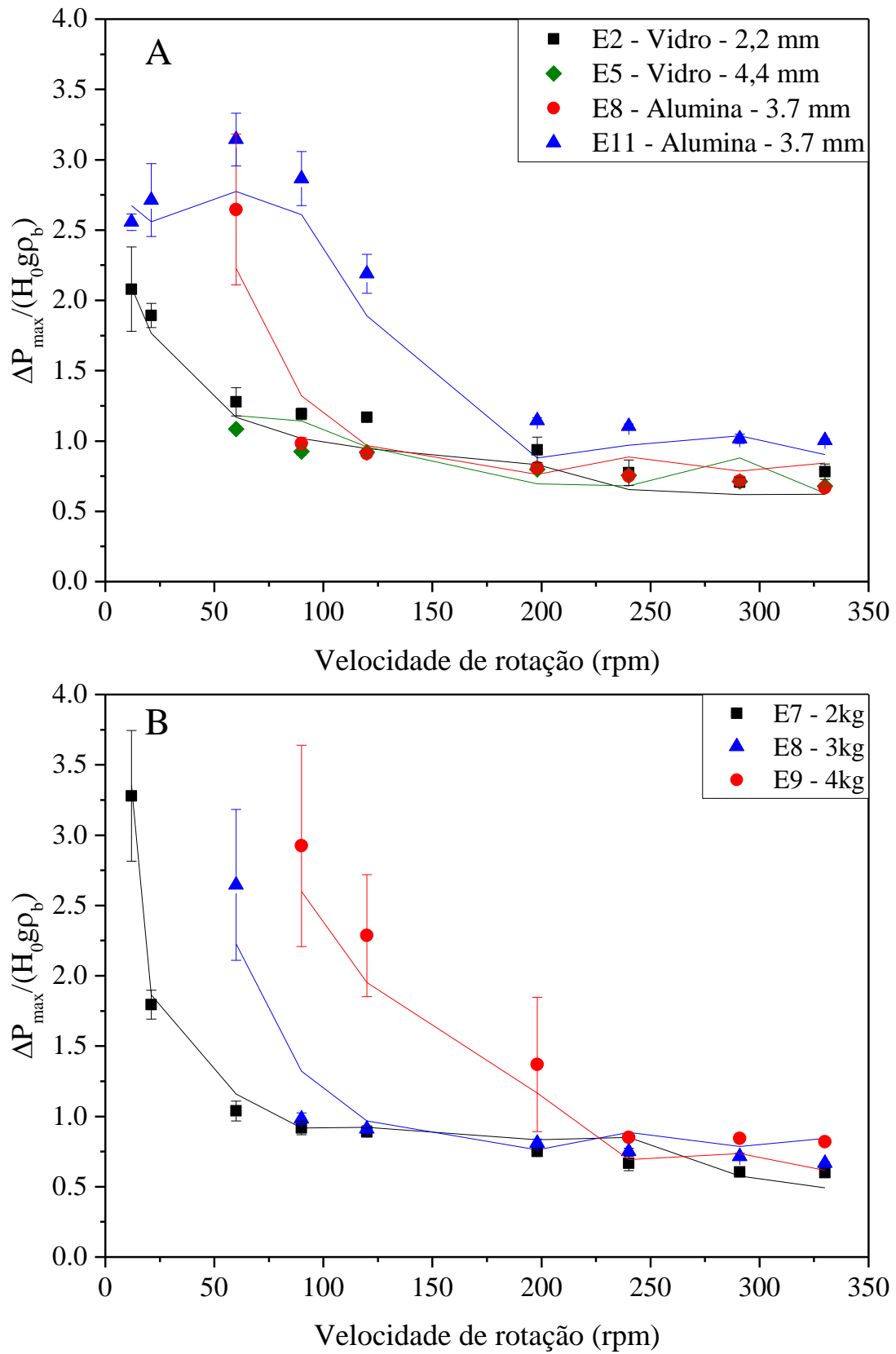
$$Re_v = 13.506 \left( \frac{H}{D_0} \right)^{0.633} (1 + Re_a)^{-0.175} Ar^{0.518} \quad (4.4)$$

**Figura 4.17** – Velocidade de mínimo jorro em função da velocidade de rotação do agitador para o agitador de pás-retas. Diferentes partículas (A); diferentes massas de partículas (B). Dados experimentais (pontos); Dados calculados (Linhas).

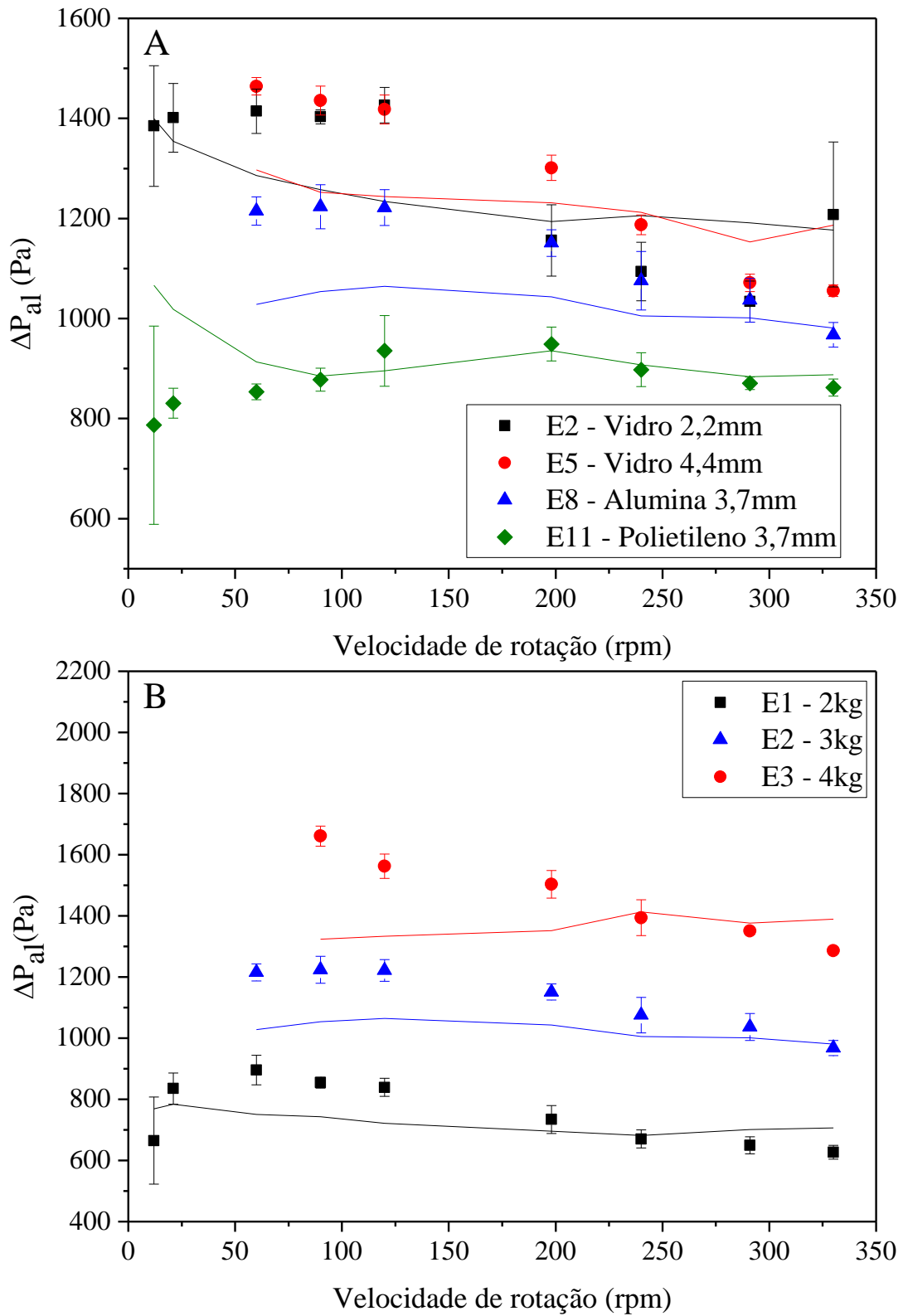




**Figura 4.18** – Queda de pressão máxima em função da velocidade de rotação para o agitador de pás-retas. Diferentes partículas (A); diferentes massas de partículas (B). Dados experimentais (pontos); Dados calculados (Linhas).



**Figura 4.19** – Queda de pressão em função da velocidade de rotação para o agitador de pás-retas. Diferentes partículas (A); diferentes massas de partículas (B). Dados experimentais (pontos); Dados calculados (Linhas).



$$\frac{\Delta P_{\max}}{H_0 \rho_b g} = 1.160 \phi^{-1.747} \left( \frac{H}{D_0} \right)^{-0.743} Ar^{-0.936} \quad (4.5)$$

$$\Delta P_{al} = 0.000016 \frac{\mu g}{rps d_p} \left( \frac{H}{D_0} \right)^{1.558} Ar^{0.480} Re_v^{-0.211} (1 + Re_a)^{0.903} \quad (4.6)$$

Em relação à queda máxima de pressão (Figura 4.18), a correlação proposta também apresenta boa concordância com os dados experimentais ( $R^2 = 0,95$  e  $\alpha = 0,05$ ) para a maioria das rotações avaliadas. Por outro lado, a correlação proposta para a queda de pressão operacional (Figura 4.19) não apresenta um bom ajuste ( $R^2 = 0,84$  e  $\alpha = 0,05$ ), principalmente sob baixas rotações do agitador, isso se deve a maior instabilidade quando o processo é realizado em baixas rotações do agitador em relação às altas rotações do agitador. Portanto, novos estudos devem ser realizados para fornecer correlações mais adequadas, capazes de prever a queda de pressão operacional no leito de jorro com agitação mecânica. Além disso, vale ressaltar que a aplicação dessas correlações é restrita e válida apenas para as condições experimentais utilizadas neste estudo.

De modo geral, a presença do agitador trouxe melhorias ao leito de partículas quando comparado com o equipamento convencional. O agitador de pás-inclinadas apresentou os melhores resultados, mesmo com diferentes velocidades de rotação e diferentes grupos de partículas. Além disso, tais equipamentos podem trazer vantagens significativas para o processo devido à diminuição tanto da queda de pressão quanto da vazão de ar necessária para agitar o leito, parâmetros diretamente relacionados aos custos de energia. Porém, conforme apresentado neste estudo, tais vantagens são condicionadas pela rotação do agitador e pelas propriedades das partículas. Apesar dessa melhora nos parâmetros fluidodinâmicos, deve ser analisado se a combinação da vazão de ar e velocidade de rotação são suficientes para promover uma circulação adequada das partículas no leito. Desta forma, no próximo item desse estudo, será analisado o tempo de ciclo das partículas, para comparar os efeitos da vazão de ar e da velocidade de rotação nessa variável.

#### **4.6 Tempo de ciclo e tempo que a partícula fica na superfície**

Nesse tópico, foram estudados dois parâmetros obtidos através de observações internas da superfície do leito, o tempo médio de ciclo das partículas e o tempo médio da

partícula na superfície. Para isso, foram avaliadas as três principais variáveis: velocidade de rotação, vazão de ar e geometria do agitador.

Tanto o tempo médio de ciclo das partículas, quanto o tempo médio da superfície são importantes para operações de recobrimento e secagem. Nas situações onde as partículas apresentem elevado tempo na superfície do leito, pode ocorrer um aumento da espessura do filme formado, levando a problemas de aglomeração devido ao aumento das forças de interação causadas pela película úmida na superfície das partículas. Esses fenômenos ocorrem devido à dispersão do material líquido na superfície do leito, como ocorre em grande parte das operações de secagem de pasta e soluções no leito de jorro.

Para o tempo de ciclo médio, é considerada a média entre o tempo que uma partícula leva para percorrer as três principais regiões de movimentação das partículas, como discutido no capítulo anterior. O tempo de ciclo está intimamente relacionado com a geometria e velocidade de rotação do agitador, uma vez que as regiões de movimentação são diferentes em função desses parâmetros. Desta forma, foi dado um foco mais específico na análise do tempo de ciclo, propondo modelo empírico para estimar os dados experimentais.

#### **4.6.1 Tempo de ciclo em diferentes agitadores**

Os experimentos realizados com diferentes velocidades de rotação tiveram como base a vazão de ar obtida pela fluidodinâmica ( $Q_{al}$ ), sendo esta diferente para cada tipo e rotação do agitador, como já mencionado na seção anterior. Desta forma, os ensaios para avaliar o tempo de superfície das partículas foram realizados considerando a  $Q_{al}$  para cada condição, como apresentado na Tabela 4.4. Para efeito de comparação entre os agitadores, na Tabela 4.4 também são apresentadas algumas condições fixando a vazão de ar (1,18 e 1,41  $m^3.min^{-1}$ ) e a velocidade de rotação (120 rpm), no intuito de analisar somente a geometria do agitador. Para ter uma representatividade dos dados, o tamanho da amostra para coleta de dados foi próximo de  $110 \pm 30$  pontos para cada experimento realizado.

Para todas as condições analisadas da Tabela 4.4, nota-se que o tempo médio de superfície é reduzido tanto com o aumento da velocidade de rotação, quanto com a vazão de ar. Esses dois parâmetros são, portanto, fundamentais para otimizar o tempo médio na superfície do leito. O mesmo fenômeno ocorre para os diferentes agitadores, sendo que os menores valores foram obtidos para rotação de 240 rpm e o agitador de pás-inclinadas se sobressaindo perante os demais. Esse resultado sugere o maior efeito da rotação sobre

o processo do que a vazão de ar. Para as mesmas condições de rotação e vazão de ar, o maior valor foi obtido para o agitador tipo parafuso, sendo que este apresentou valor superior de 173% e 122% em comparação com o agitador de pás-inclinadas e pás-retas, respectivamente. Nesse caso, os dados indicam uma menor circulação das partículas do agitador tipo parafuso frente aos demais. Esse resultado pode ser justificado devido a fatores já discutidos nos itens anteriores, como em relação a área de contato direto com o agitador e as regiões de movimentação das partículas, ou também devido o sentido de circulação (rotação) das partículas no leito.

**Tabela 4.4** – Velocidade de rotação, vazão de ar e tempo médio de superfície, para partículas de alumina 3kg (E8).

<b>Agitador</b>	<b><math>\Omega</math> (rpm)</b>	<b><math>Q_{al}</math> (<math>m^3 \cdot min^{-1}</math>)</b>	<b><math>T_m</math> superfície (s)</b>
<b>Pás-retas</b>	90	1,12	5,1
	120	0,94 = 1,00 $Q_{al}$	2,9
	240	0,89	1,3
	120	1,18 = 1,25 $Q_{al}$	2,6
	120	1,41 = 1,50 $Q_{al}$	2,1
<b>Pás-inclinadas</b>	90	0,79	6,4
	120	0,86 = 1,00 $Q_{al}$	3,7
	240	0,67	1,0
	120	1,08 = 1,25 $Q_{al}$	3,5
	120	1,29 = 1,50 $Q_{al}$	2,1
	120	1,18	3,2
<b>Parafuso</b>	120	1,41	3,4
	90	1,16	9,1
	120	1,16 = 1,00 $Q_{al}$	6,6
	240	1,16	3,4
	120	1,45 = 1,25 $Q_{al}$	6,9
	120	1,74 = 1,50 $Q_{al}$	6,8
	120	1,18	7,1
120	1,41	6,3	

Visualizações internas mostraram que o agitador tipo parafuso tem um comportamento diferente dos demais em relação ao sentido de rotação das partículas. Para o parafuso, as partículas são transportadas para cima pelo agitador no centro do leito até atingirem o topo, onde vão em direção à parede do equipamento (pela superfície do leito) seguindo uma trajetória reta, retornando posteriormente para a região anular próximo a parede. Já para os demais agitadores as partículas sobem em um movimento helicoidal e aparecem próximo à parede do equipamento, seguindo movimentos circulares até o centro, onde retornam para dentro do leito de partículas. Apesar da trajetória circular

percorrer uma maior distância do que a linear, os agitadores de pás promovem uma movimentação maior de todo o leito devido ao contato direto com as pás do agitador. Isso faz com que as partículas se movimentem com maior velocidade no leito, enquanto no parafuso a maior movimentação das partículas ocorre em sua maior parte no centro onde existe o contato direto com o agitador.

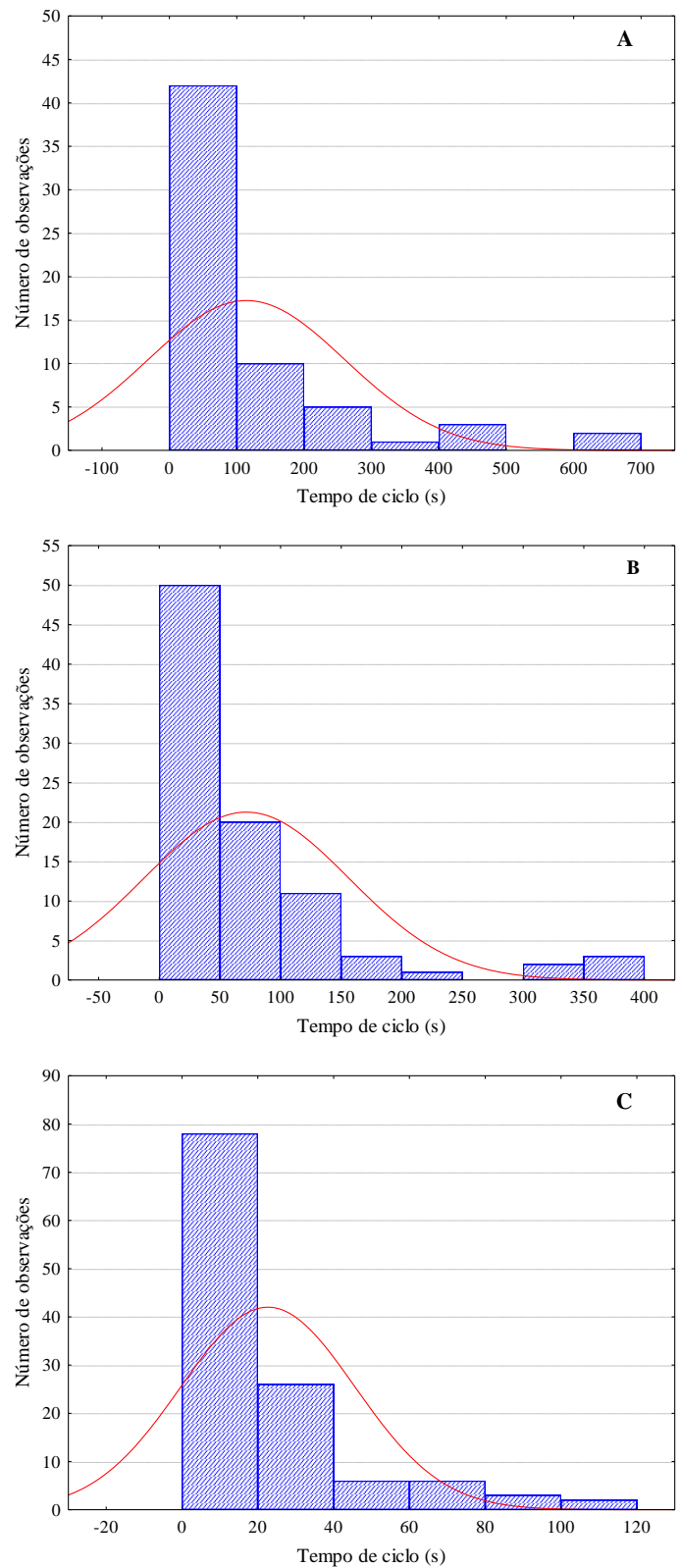
Ao contrário do tempo de superfície, o tempo de ciclo precisaria considerar todo o percurso da partícula pelo leito. Alguns autores, estudando o equipamento convencional, consideram o tempo de ciclo aquele que a partícula leva para percorrer o caminho entre as três regiões de movimentação (jorro, fonte e anular) (MATHUR; EPSTEIN, 1974). Um outro estudo utiliza a média dos dados obtidos e calcularam o tempo médio dividindo a massa de partículas pela média obtida (ALTZIBAR et al., 2013). Nesse estudo não será necessário dividir a massa de partículas, uma vez que os ensaios foram realizados para o mesmo grupo de partículas (E8). Desta forma, será utilizado somente o valor médio dos dados.

As mesmas condições experimentais empregadas na Tabela 4.4 foram utilizadas para determinar o tempo médio de ciclo das partículas. Para visualizar a distribuição dos tempos de ciclo aleatórios medidos, histogramas foram traçados para cada um e o tempo médio de ciclo é obtido pela média desses valores. Na Figura 4.20 são apresentados os histogramas para diferentes velocidades de rotação e a curva de distribuição normal. Os resultados do tempo médio de ciclo são apresentados nas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 para os três tipos de agitadores empregados nesse estudo, pás-retas, pás-inclinadas e o parafuso helicoidal, respectivamente. Para esses experimentos, foram considerados os tempos máximo, médio e mínimo das partículas.

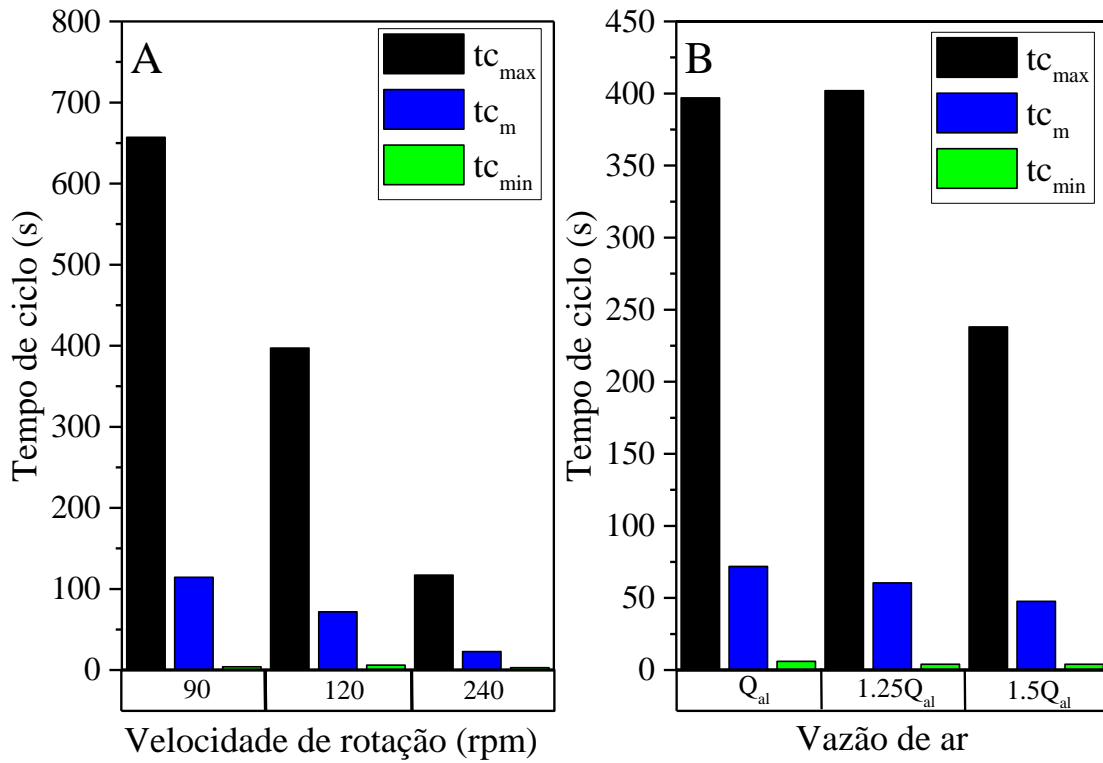
Na Figura 4.21 observa-se que a velocidade de rotação reduz o tempo de ciclo das partículas, mesmo que para maior velocidade de rotação a vazão de ar seja menor, como apresentado na Tabela 4.4. Assim, ocorre uma redução no tempo médio de ciclo próximo de 37% (90 para 120 rpm) e 68% (120 para 240 rpm). Para essas mesmas condições houve um aumento de 33% e 50% na velocidade de rotação, enquanto na vazão de ar houve uma redução de 16% e 5%. Também foi verificado que houve redução no tempo de ciclo máximo e mínimo com o aumento da velocidade de rotação. Esses resultados indicam que a redução do tempo médio de ciclo é devido a um efeito combinado de ambos os parâmetros, mas em proporções diferentes. Quando analisado o efeito somente da vazão de ar (Figura 4.21–B), nota-se que houve redução de 16% ( $1,00 Q_{al}$  para  $1,25 Q_{al}$ ) e

21% ( $1,25 Q_{al}$  para  $1,50 Q_{al}$ ) no aumento da vazão de ar. Apesar desse resultado, para o tempo de ciclo máximo não foi verificada alteração para  $Q_{al}$  e  $1,25 Q_{al}$ .

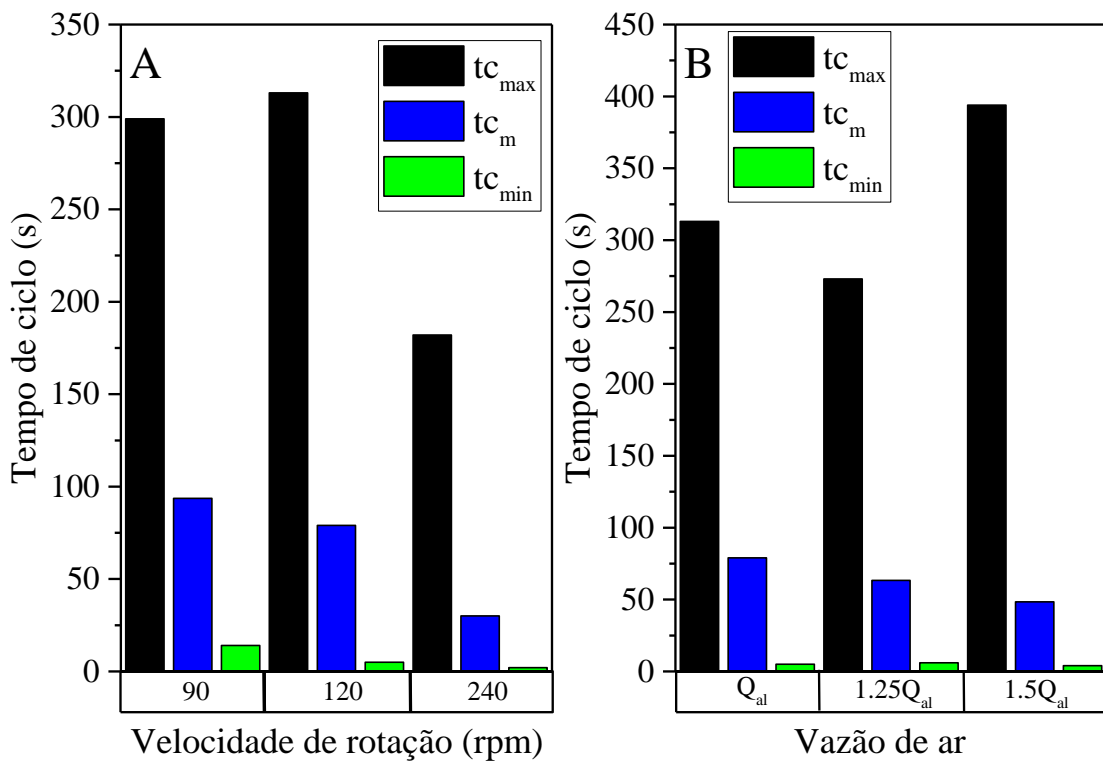
**Figura 4.20** – Histograma do tempo de ciclo para pás-retas com velocidades de rotação de 90 rpm (A), 120 rpm (B) e 240 rpm (C).



**Figura 4.21** – Tempo de ciclo das partículas para o agitador de pás-retas. A –  $Q_{al}$  para cada velocidade de rotação; B – Velocidade de rotação de 120 rpm.

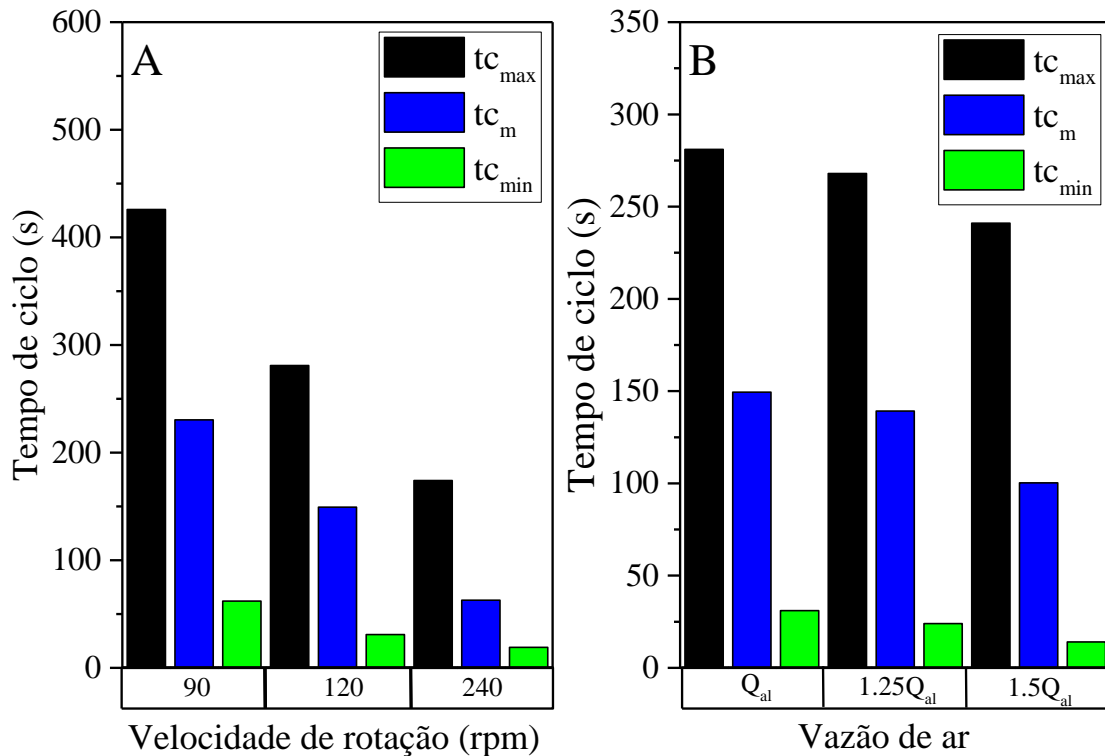


**Figura 4.22** – Tempo de ciclo das partículas para o agitador de pás-inclinadas. A –  $Q_{al}$  para cada velocidade de rotação; B – Velocidade de rotação de 120 rpm.





**Figura 4.23** – Tempo de ciclo das partículas para o agitador de parafuso helicoidal. A –  $Q_{al}$  para cada velocidade de rotação; B – Velocidade de rotação de 120 rpm.



Para a Figura 4.22, o agitador de pás-inclinadas apresentou redução no tempo médio de ciclo próximo de 16% (90 para 120 rpm) e 64% (120 para 240 rpm), sendo essa última redução maior do que a observada no processo com pás-retas. Já para vazão de ar a redução foi de 20% ( $1,00 Q_{al}$  para  $1,25 Q_{al}$ ) e 24% ( $1,25 Q_{al}$  para  $1,50 Q_{al}$ ), sendo esses valores ligeiramente superiores ao agitador de pás-retas. No agitador tipo parafuso apresentado na Figura 4.23, o tempo de ciclo máximo, médio e mínimo apresentou redução quase linear com o aumento da rotação. A redução foi de aproximadamente de 35% (90 para 120 rpm) e 58% (120 para 240 rpm). Nesse caso, quando comparado com o agitador de pás-retas, em baixas rotações a redução foi maior e em altas rotações a redução do tempo de ciclo foi menor. Para vazão de ar a redução foi de 8% ( $1,00 Q_{al}$  para  $1,25 Q_{al}$ ) e 18% ( $1,25 Q_{al}$  para  $1,50 Q_{al}$ ), sendo esses valores menores do que os demais agitadores.

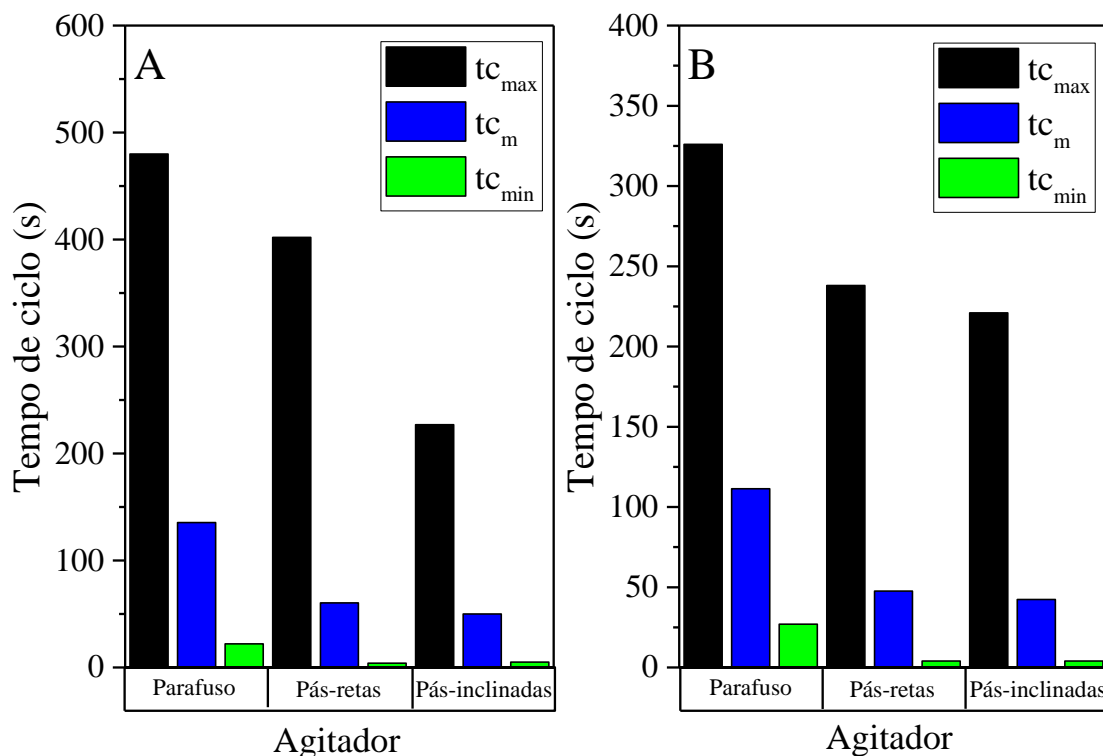
Os resultados apresentados para o tempo de ciclo em função da velocidade de rotação são condizentes com os dados da literatura (KUDRA et al., 1989; NÉMETH et al., 1983; NÉMETH; PALLAI; ARADI, 1983; SZENTMARJAY; PALLAI, 1989; SZENTMARJAY; SZALAY; PALLAI, 1992). Todos esses autores também observaram que o ciclo das partículas diminui à medida que a velocidade de rotação aumenta no leito

de jorro mecânico com entrada da vazão de ar tangencial. Resultados semelhantes também foram observados por Reyes et al. (2001), que observaram uma diminuição no valor do tempo médio de residência quando a agitação foi introduzida no sistema.

Os resultados apresentados anteriormente, indicam que existe uma relação entre as variáveis do processo e o tempo de ciclo das partículas, sendo maior para a velocidade de rotação e menor para a vazão de ar. Apesar desses resultados, nota-se que existe uma relação com a geometria dos agitadores, entretanto fica difícil fazer uma comparação mais direta empregando diferentes condições operacionais.

Os estudos relacionados ao tempo de ciclo das partículas em leito de jorro convencional e modificado utilizam a vazão de ar baseada na fluidodinâmica, como foi feito para as diferentes velocidades de rotação anteriormente (Figura 4.21-4.23). Apesar de ser possível realizar uma comparação entre os resultados, esses sempre vão estar sobre a influência de mais de uma variável, velocidade de rotação e a vazão de ar necessária para agitar o leito. Para evitar esse problema e analisar somente a variação do tempo de ciclo para diferentes agitadores, foram empregadas as mesmas condições operacionais da velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de  $1,18 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  (Figura 4.24-A) e  $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  (Figura 4.24-B).

**Figura 4.24** – Tempo médio de ciclo das partículas para diferentes agitadores para velocidade de rotação de 120 rpm. A – Vazão de ar de  $1,18 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ; B – Vazão de ar de  $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .



Na análise dos diferentes agitadores, fica mais direto identificar que os agitadores de pás se sobressaíram em comparação com o parafuso helicoidal para as duas vazões de ar analisadas. Em comparação com o parafuso, o agitador de pás-inclinadas apresentou uma redução de 53, 63 e 77% (Figura 4.24-A) para  $t_{c_{max}}$ ,  $t_{c_m}$  e  $t_{c_{min}}$ , respectivamente. Enquanto, na Figura 4.24-B, os valores foram de 32, 62 e 85%. Esse resultado sugere que em processos com maior vazão de ar não ocorre mudança significativa no tempo de ciclo, principalmente para o  $t_{c_m}$ . Além desses resultados, observa-se que o agitador de pás-inclinadas apresentou uma redução no tempo de ciclo médio de 17% e 13%, Figura 4.24-A e B, respectivamente.

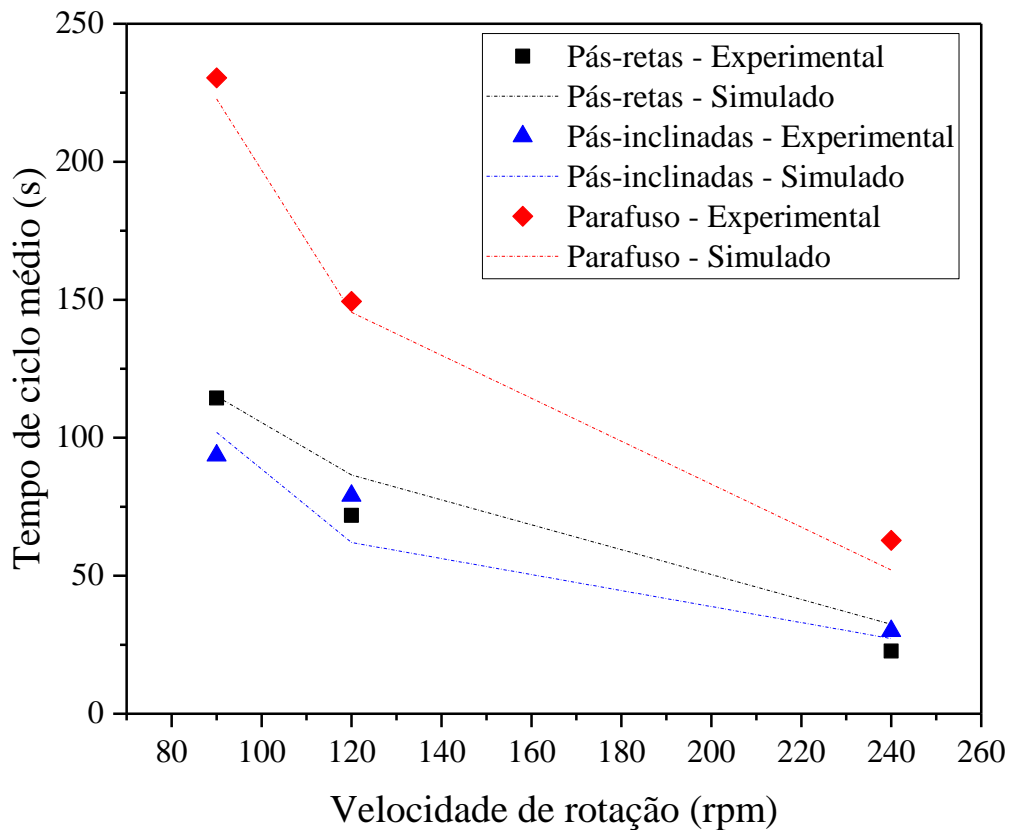
#### 4.6.2 Modelo empírico do tempo de ciclo

Os resultados apresentados anteriormente, sugerem que o tempo de ciclo das partículas está relacionado com variáveis do processo como geometria do agitador, velocidade de rotação e vazão de ar. Entretanto, estes foram desenvolvidos baseando na porcentagem da vazão de ar necessária para agitar o leito (1,0-1,25-1,50 da  $Q_{al}$ ). Apesar disso, em alguns projetos é necessário utilizar uma vazão de ar que pode estar limitada por a outras condições do processo. Tendo isso em vista, foi ajustado um modelo empírico baseando na vazão de ar operacional ( $m^3 \cdot min^{-1}$ ). Desta forma, para ajustar o modelo empírico aos dados experimentais, foi utilizado um valor numérico para cada agitador, sendo indicado por 2, 4 e 6 para os agitadores tipo parafuso, pás-retas e pás-inclinadas, respectivamente. As demais variáveis foram empregadas no Sistema Internacional de medidas.

Na Equação 4.10, todas as constantes estimadas foram significativas ( $p < 0,05$ ), com exceção da constante “e” (0,655), sendo justificado devido os dados de densidade, altura do leito, massa e diâmetro das partículas serem iguais nesses experimentos. O ajuste foi feito com nível de significância de 95% e apresentou coeficiente de regressão quadrático ( $R^2$ ) de 0,927. As previsões do modelo pelos dados experimentais e simulados podem ser visualizados na Figuras 4.25.

$$T_{cm} = 1,265 (\Omega^{-1,482}) (Q_{op}^{-0,808}) (Ag^{-0,994}) \left( \frac{\rho H}{M dp} \right)^{0,655} \quad (4.10)$$

**Figura 4.25** – Tempo de ciclo médio em função da velocidade de rotação para diferentes agitadores baseando na  $Q_{al}$ . Dados experimentais (pontos); Dados calculados (Linhas).



Os resultados e discussões desse item vão ajudar no melhor entendimento do tempo de movimentação das partículas dentro do leito e o comportamento das partículas em função das diferentes configurações dos agitadores. Além disso, esses resultados e modelos propostos podem auxiliar na escolha do melhor agitador e também na melhor condição operacional para operar um leito de partículas com agitação mecânica. Desta forma, foi possível identificar quais variáveis possuem efeito significativo no tempo de ciclo médio das partículas. Para isso foram avaliadas as principais variáveis: velocidade de rotação e vazão de ar, além da geometria do agitador. Observou-se que todas as variáveis foram significativas no processo, mas a velocidade de rotação se destacou sobre as demais. Esse resultado sugere que a rotação do agitador tem maior impacto no tempo de ciclo do que o tipo de agitador empregado. Com isso, é possível um ajuste mais fino das variáveis do processo pelo controle da velocidade de rotação, sendo que esse é um mecanismo importante que pode auxiliar em diversas operações, como exemplo podemos mencionar o processo de secagem de pastas e soluções. Esse controle mais definido da movimentação das partículas em função da velocidade de rotação, pode auxiliar na melhora da estabilidade e evitar problemas operacionais durante a secagem.

#### **4.7 Secagem de pasta com diferentes configurações do leito de jorro**

Conforme já exposto em itens anteriores, relacionados à fluidodinâmica, o tempo de ciclo das partículas e o tipo de agitador afetam diretamente o comportamento das partículas e consequentemente os fenômenos que ocorrem dentro do leito. Durante as discussões, algumas inferências foram realizadas para mostrar que a presença do agitador no leito pode causar alterações na queda de pressão e circulação das partículas no leito, além da homogeneidade do leito. Na sequência, foi realizada uma análise para o processo de secagem de pasta e soluções com as diferentes configurações de agitadores já estudadas, como pás-inclinadas, pás-retas, parafuso helicoidal e esses sendo comparados com o equipamento convencional.

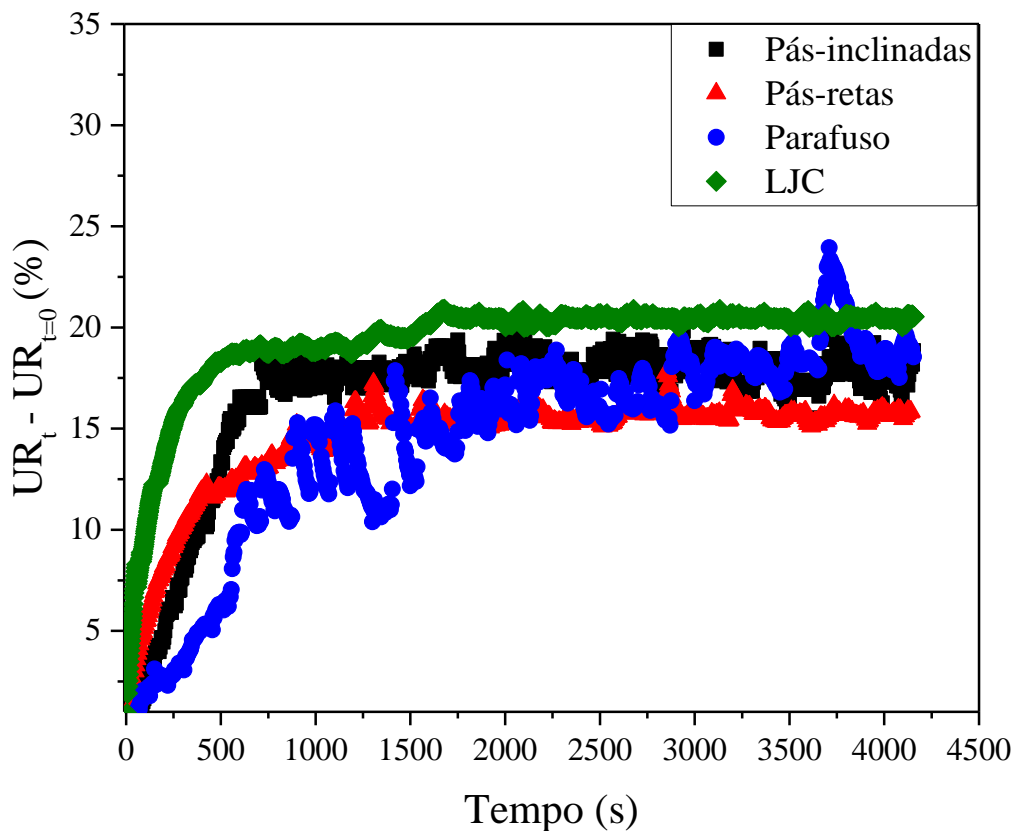
Sendo assim, esse tópico tem por objetivo analisar e discutir os efeitos que o agitador mecânico pode causar no processo de secagem com diferentes composições químicas das pastas, vazão de ar e velocidade de rotação do agitador. Para atingir tal objetivo, foram empregados três tipos de pastas diferentes: água destilada (considerada como pasta ideal), carbonato de cálcio (considerada uma suspensão por ser uma mistura de partículas sólidas) e leite desnatado (considerada por ter características coesivas). Em relação à vazão de ar operacional, foram realizados dois grupos de experimentos, um baseando-se na mesma vazão do LJC, no intuito de comparar somente a diferença entre as configurações e o outro grupo baseando-se na vazão de ar necessária para agitar o leito ( $Q_{al}$ ). Por último, foi fixada a vazão de ar para analisar o efeito da velocidade de rotação para uma mesma configuração do equipamento. Todos esses experimentos são apresentados na Tabela 3.2 na seção 3.4.5, utilizando vazão de pasta de  $20 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  e temperatura do ar de secagem de  $90^\circ \text{ C}$ .

De modo geral, a análise será baseada nos dados da umidade relativa, da temperatura do ar na saída e da queda de pressão. Ao final serão apresentados também os dados de umidade do pó recolhido na saída do ciclone. Os demais dados, ou seja, umidade absoluta, não serão considerados neste item uma vez que não apresentaram comportamento significativamente diferente dos dados que já serão apresentados.

#### 4.7.1 Efeito das diferentes configurações do leito de jorro na secagem de carbonato de cálcio

Nas Figura 4.26 e 4.27, estão representados os dados da umidade relativa no tempo ( $UR_t$ ) e temperatura do ar na saída do leito ( $T_s$ ) para secagem de carbonato de cálcio com diferentes configurações do leito de jorro com agitador mecânico e com o equipamento convencional (LJC). Para o processo de secagem foi empregada a mesma vazão de ar em todas as condições para observar o efeito somente da configuração dos diferentes agitadores e comparar com o equipamento convencional. Desta forma, foi empregada a vazão de ar de  $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ , a qual corresponde a uma proporção de 1,30 da vazão de mínimo jorro, como já explicado em trabalhos anteriores (BARROS, 2018).

**Figura 4.26** – Umidade relativa em função do tempo de secagem de carbonato de cálcio para diferentes configurações do agitador mecânico. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de  $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .



Observa-se que para as quatro configurações apresentadas, ocorreu o aumento da UR no decorrer do processo devido a remoção da água presente na pasta alimentada. Esse processo ocorreu até que um regime estacionário fosse atingido, ou seja, o equilíbrio do

processo, sendo que os valores desses foram relativamente próximos no equilíbrio ( $\pm 17\%$ ). Esse resultado é consistente com os fenômenos envolvidos no processo, uma vez que foi empregada a mesma vazão de ar, vazão de pasta, tipo de pasta e temperatura do ar de secagem na entrada do leito. Como a UR é função principalmente dessas variáveis, seu valor obtido na secagem, bem como sua capacidade máxima, é controlado por essas variáveis. Apesar desses resultados, o tempo para atingir o equilíbrio foi diferente para cada uma das configurações. Assim, a presença dos diferentes agitadores dentro do leito provoca uma alteração no regime transiente do processo de secagem. Nesse caso ocorre uma influência da movimentação das partículas dentro do leito e principalmente da velocidade de homogeneização do leito nos instantes iniciais do processo. Nessa etapa inicial do processo, ocorre a inserção da pasta sobre o leito e o primeiro recobrimento das partículas, ainda com a temperatura do ar de entrada inicial.

Sendo assim, sob influência desses fenômenos e aliado ao tipo de configuração empregada dentro do leito, estes influenciam no regime transiente no processo de secagem e na velocidade de decaimento da UR. Sob essas circunstâncias, a maior velocidade de decaimento foi para o LJC, seguida pelo agitador de pás-inclinadas, pás-retas e por último o agitador tipo parafuso helicoidal.

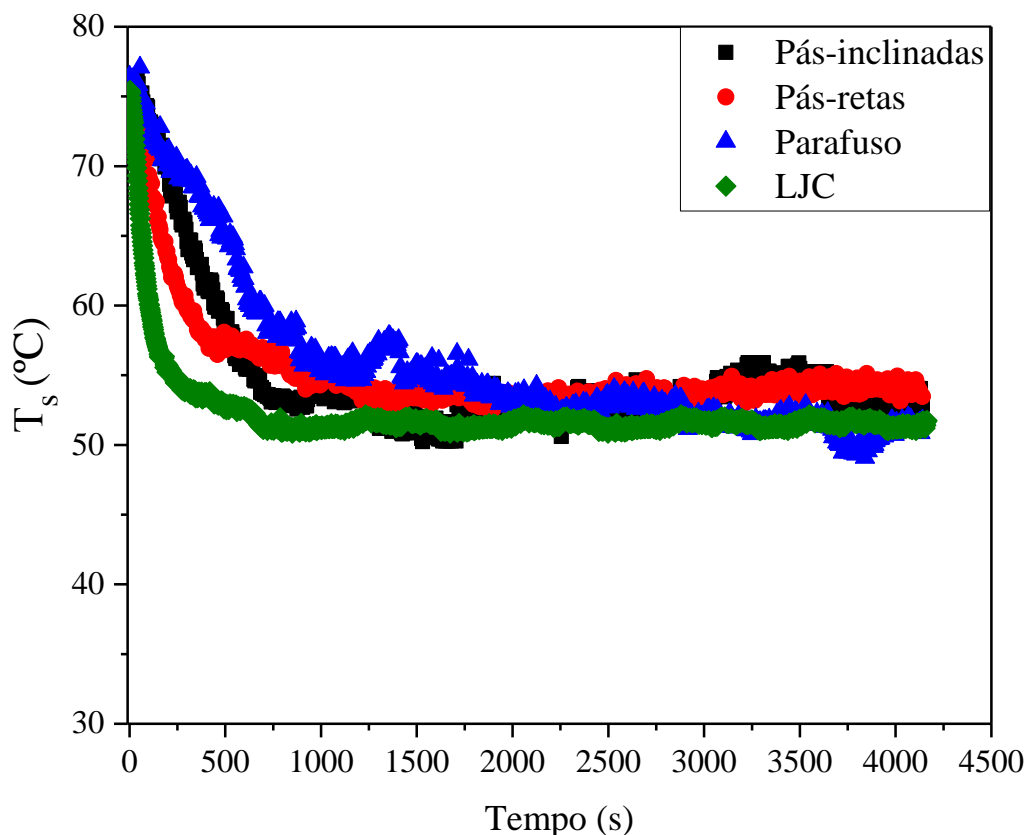
Os experimentos tiveram comportamentos aparentemente estáveis, com exceção do agitador tipo parafuso. Nessa configuração, foram observadas perturbações nos valores de umidade relativa e temperatura do ar na saída após 500 segundos. Esse resultado pode ser devido à baixa movimentação das partículas no leito, como já foi apresentado e discutido em seções anteriores, principalmente em relação ao tempo de ciclo que é inferior os demais agitadores. Uma vez que o agitador de pás-inclinadas apresentou redução de 62% do tempo de ciclo médio em relação ao agitador tipo parafuso, para vazão de  $1,41 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$ .

Para os valores da temperatura do ar na saída observados na Figura 4.27, o comportamento encontrado é condizente com os apresentados para a umidade relativa. Observa-se que para todas as configurações empregadas, o valor de  $T_s$  no equilíbrio são análogas, mas foi obtido com diferentes tempos durante o regime transiente. Apesar desse resultado, nota-se que a  $T_s$  foi significativamente inferior para o LJC e para o agitador tipo parafuso.

Nas Figuras 4.28 e 4.29, foram empregadas vazões de ar diferentes para secagem de carbonato de cálcio. Com o intuito de analisar o efeito da secagem empregando vazão de ar obtida através da curva fluidodinâmica, foram realizados experimentos com as

mesmas condições operacionais das anteriores, mas variando o agitador e a vazão de ar para cada um desses. Foi utilizado 30% acima da vazão necessária para agitar o leito ( $Q_{al}$ ), sendo essa porcentagem empregada de forma similar no equipamento convencional. Esse procedimento é comumente utilizado na literatura para secagem de pastas e soluções. A vazão necessária para agitar o leito, já foi obtida nas seções anteriores através da curva fluidodinâmica. Nas Figuras 4.28 e 4.29, são indicados que no início do processo de secagem, o regime transiente é diferente para cada equipamento, como já discutido anteriormente. Nota-se também que uma grande instabilidade no agitador tipo parafuso, provavelmente devido à baixa vazão de ar ( $1,04 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ) aliada a baixa circulação das partículas no leito.

**Figura 4.27** – Temperatura do ar na saída em função do tempo de secagem de carbonato de cálcio para diferentes configurações do agitador mecânico. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de  $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .

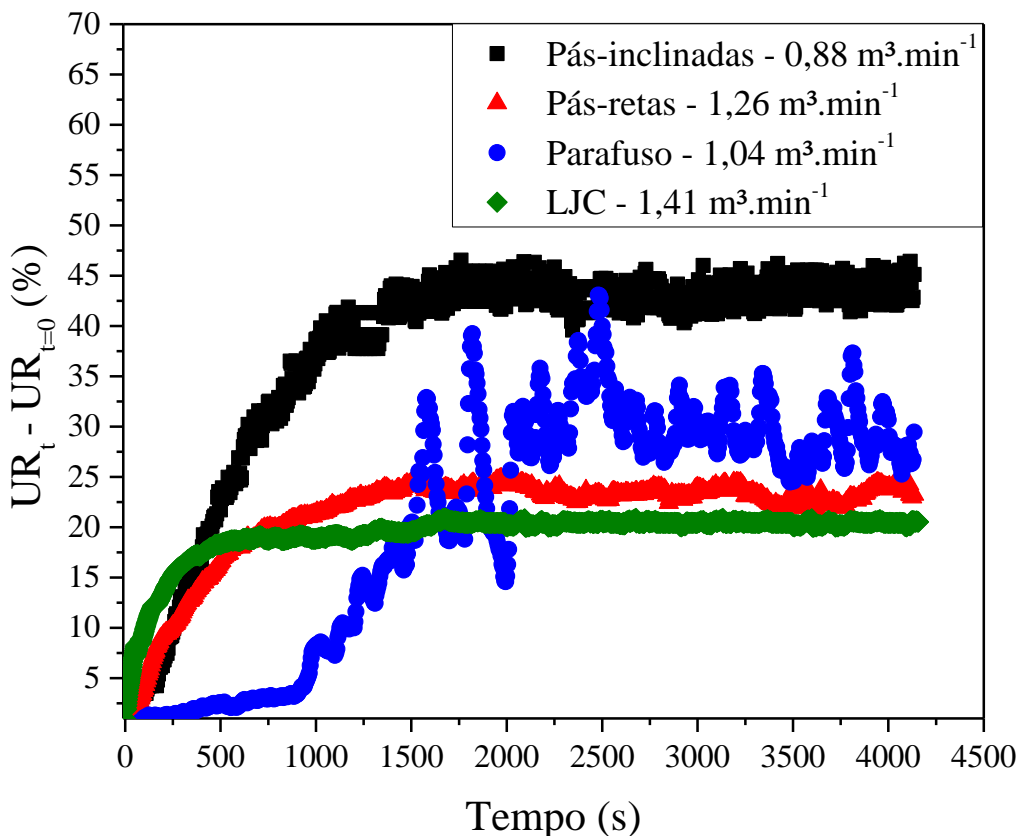


Para o agitador de pás-inclinadas e pás-retas a velocidade de decaimento foi relativamente similar, mas após 900 segundos nota-se que o agitador de pás-inclinadas teve um aumento mais significativo no valor da UR. Uma das justificativas para esse maior valor é a menor vazão de ar ( $0,88 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ) dentre as configurações apresentadas.



Nesse caso, um maior valor da UR para o agitador de pás-inclinadas sugere um maior aproveitamento do ar de secagem e consequentemente tendo uma eficiência maior no processo. De modo geral, a UR no equilíbrio foi de aproximadamente 43, 23, 25 e 19% para agitador de pás-inclinadas, pás-retas, parafuso e LJC, respectivamente. Sendo assim, a UR do agitador de pás-inclinadas foi aproximadamente 47% maior do que o de pás-retas, para uma relação da vazão de ar 30% menor. Em comparação com o LJC, o agitador de pás-inclinadas foi 56% maior.

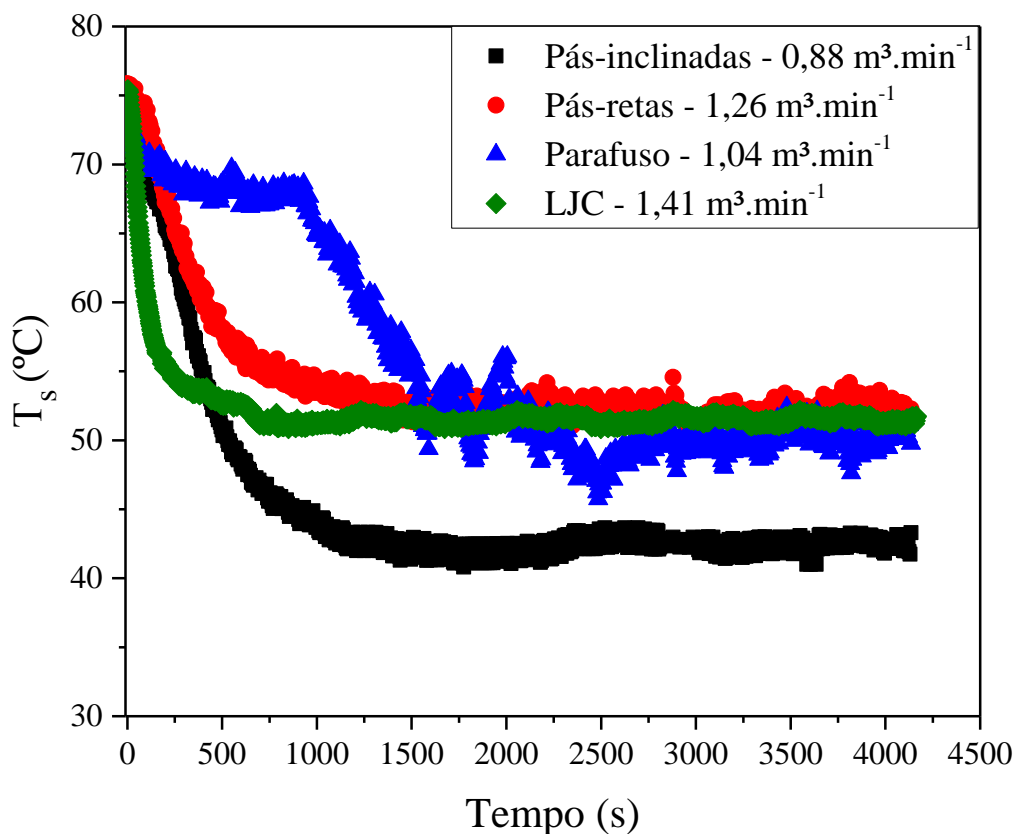
**Figura 4.28** – Umidade relativa em função do tempo de secagem de carbonato de cálcio para diferentes configurações do agitador mecânico. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm.



Na Figura 4.29, observa-se que a  $T_s$  no equilíbrio foi próxima para as configurações empregadas, com exceção do agitador de pás-inclinadas, devido sua baixa vazão de ar em comparação com as demais, como já discutido anteriormente.

Um resultado importante a ser observado tanto na Figura 4.28, quanto na Figura 4.29, é que mesmo com menor vazão de ar para o agitador de pás-retas, este apresentou comportamento similar ao equipamento convencional. Desta forma, esse resultado indica uma possível substituição do LJC com uma menor vazão de ar, sem alterar a cinética de secagem, proporcionando uma redução nos custos do processo.

**Figura 4.29** – Temperatura do ar na saída em função do tempo de secagem de carbonato de cálcio para diferentes configurações do agitador mecânico. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm.



#### 4.7.2 Efeito das diferentes configurações do leito de jorro na secagem de leite

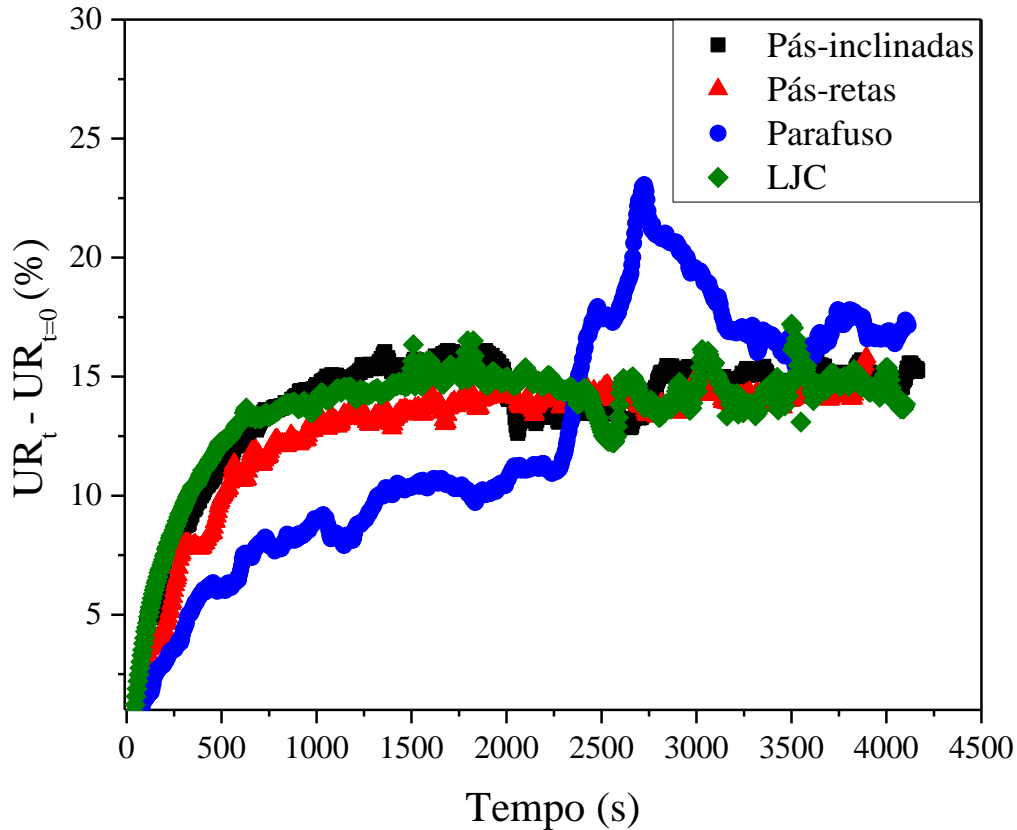
Nas Figuras 4.30 e 4.31, são apresentados os resultados para secagem de leite desnatado empregando vazão de ar de  $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . Esses experimentos foram desenvolvidos para analisar o comportamento das diferentes configurações com uma pasta real, em condições similares de operação.

Os valores da UR no equilíbrio foram similares nas diferentes configurações utilizadas, além disso durante o regime transiente a velocidade de decaimento foi semelhante, com exceção do parafuso helicoidal. Esse resultado é diferente do que ocorreu na Figura 4.26 (secagem de carbonato de cálcio), na qual o regime transiente é específico para cada tipo de configuração. Tal resultado pode ser justificado pelo tipo de pasta empregada. Além disso, tanto a UR, quanto a  $T_s$  no equilíbrio foram similares em todas as configurações empregadas, sendo justificado pela mesma vazão de ar.

Para a secagem de leite empregando vazão de ar baseada na fluidodinâmica ( $Q_{at}$ ), foram realizados os ensaios apresentados na Figura 4.32-A e B. Devido à baixa vazão do

ar do agitador de pás-inclinadas, não foi possível realizar a secagem nessa condição, mas com o agitador de pás-retas foi possível realizar a secagem de forma estável e controlada.

**Figura 4.30** – Umidade relativa em função do tempo de secagem de leite para diferentes configurações do agitador mecânico. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de  $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .

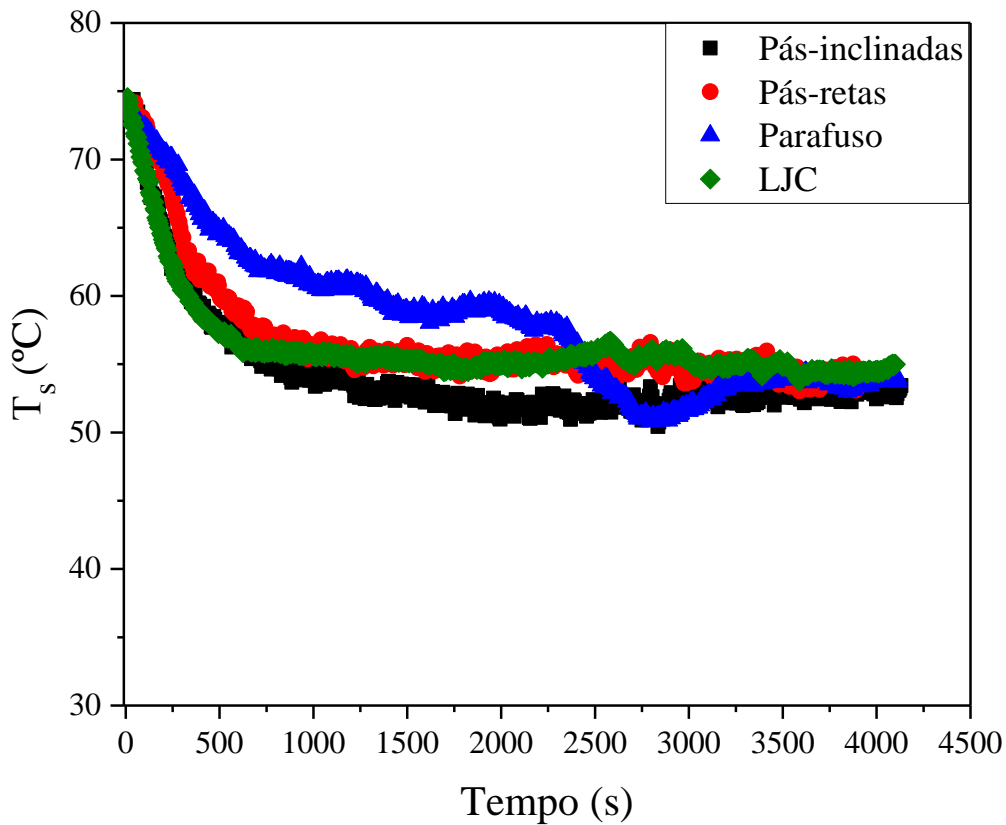


Para secagem com parafuso, nota-se uma perturbação na secagem de leite como observada na Figura 4.32. Esse resultado pode ser explicado por um maior acúmulo de produto no leito e consequentemente uma redução na movimentação global das partículas. Nesse caso, ocorreu a formação de uma “crosta” próximo à parede do leito, ocorrendo movimento das partículas somente no centro do leito, onde o agitador está em contato direto com as partículas do leito. Tal fenômeno pode ser observado na Figura 4.33, que mostra uma ilustração do interior do leito ao final do processo de secagem. Esse tipo de problema já havia ocorrido com outros autores empregando o mesmo agitador e a mesma de pasta, mas com diâmetro do leito de jorro maior (1,56 vezes maior) (SOUSA, 2017).

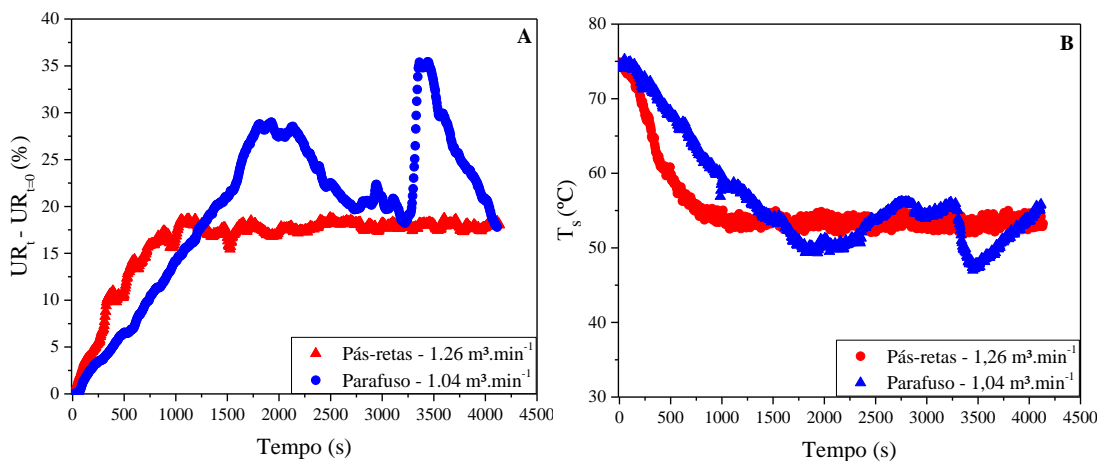
O processo indesejável apresentado nas Figuras 4.32 e 4.33, consiste no acúmulo e na aglomeração de partículas dentro do leito, entretanto o fenômeno de acúmulo ocorre em diversos equipamento de secagem de pastas e soluções, principalmente na etapa inicial do processo, na qual o recobrimento das partículas é mais significativo. Quando a taxa de

remoção do pó formado for menor do que a taxa de alimentação (recobrimento das partículas), ocorre o processo de acúmulo. Quando essas taxas forem iguais é atingido o equilíbrio e se inicia o regime permanente, mas a estabilidade da secagem poderá ser afetada se a etapa de desprendimento do filme for um fator limitante no processo (BARRET; FANE, 1990; PERAZZINI, 2015).

**Figura 4.31** – Temperatura do ar na saída em função do tempo de secagem de leite para diferentes configurações. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de  $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .



**Figura 4.32** – Umidade relativa (A) e temperatura do ar na saída (B) para secagem de leite. Dados: Vazão de ar de  $1,26 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  (Pás-retas) e  $1,04 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  (Parafuso).



**Figura 4.33** – Interior do leito de jorro na secagem de leite desnatado com agitador tipo parafuso helicoidal. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de  $1,04 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .



Perturbações e instabilidades durante a secagem com agitadores mecânicos foram encontrados em poucos estudos, mas Szentmarjay e Pallai (2000) observaram esses fenômenos quando em elevadas vazões de alimentação de pasta (hidróxido de alumínio) e Sousa (2017) com menor vazão de ar na secagem de leite desnatado, ambos utilizando o agitador tipo parafuso helicoidal. Na configuração com o equipamento convencional, existem relatos de instabilidade na secagem de leite desnatado quando próximo da capacidade máxima do equipamento (ALMEIDA, 2009). Barros (2018) também verificou na secagem com carbonato de cálcio que dependendo das condições operacionais pode ocorrer problema, como instabilidade, acúmulo e aglomeração, e em casos mais graves o colapso do jorro e a interrupção do processo de secagem.

Os fenômenos de instabilidade no leito, ocorrem principalmente para operação próxima à capacidade máxima do equipamento, onde as condições do processo não conseguem mais remover a umidade presente na superfície das partículas. No estudo de Reyes e Vidal (2000), foi verificado que a capacidade máxima do leito com agitador mecânico aumenta com maiores valores da velocidade de rotação do agitador. Desta forma, acredita-se que uma opção para melhorar a estabilidade do processo é utilizar

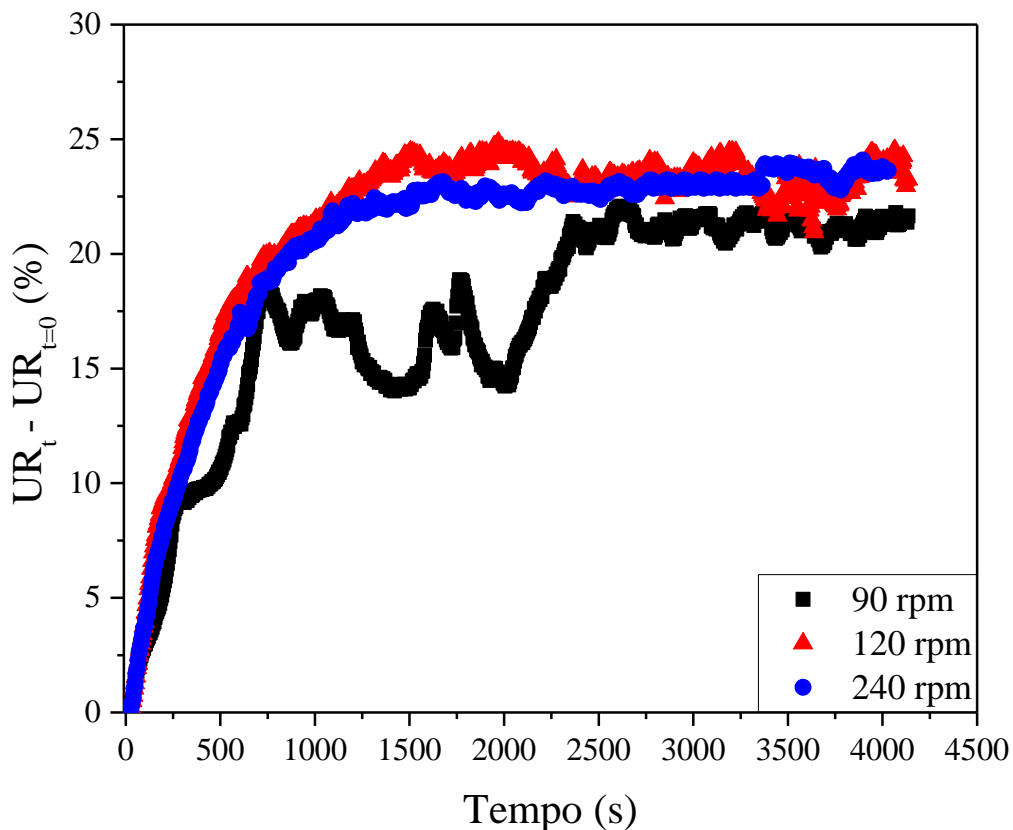
maior velocidades de rotação e assim melhorar o grau de agitação das partículas dentro do leito, evitando também problemas operacionais de aglomeração e acúmulo.

### 4.7.3 Efeito da velocidade de rotação sobre a cinética de secagem

Como mencionado anteriormente, o atrito entre as partículas é necessário para que exista o processo de secagem, uma vez que é esse atrito que promove a formação do pó. Como já se sabe, a velocidade de rotação do agitador afeta diretamente a taxa de circulação das partículas, e com isso proporciona os choques entre as partículas e entre as partículas e a parede dentro do leito. Dessa forma, pode-se inferir que a velocidade de rotação do agitador controla a taxa de remoção do produto e conseqüentemente a cinética de secagem.

Nas Figuras 4.34 e 4.35, são apresentados os resultados da secagem para 90, 120 e 240 rpm empregando agitador de pás-retas. Esses ensaios foram realizados com a mesma vazão de ar ( $Q_{al} = 1,26 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ), referente a fluidodinâmica de 120 rpm.

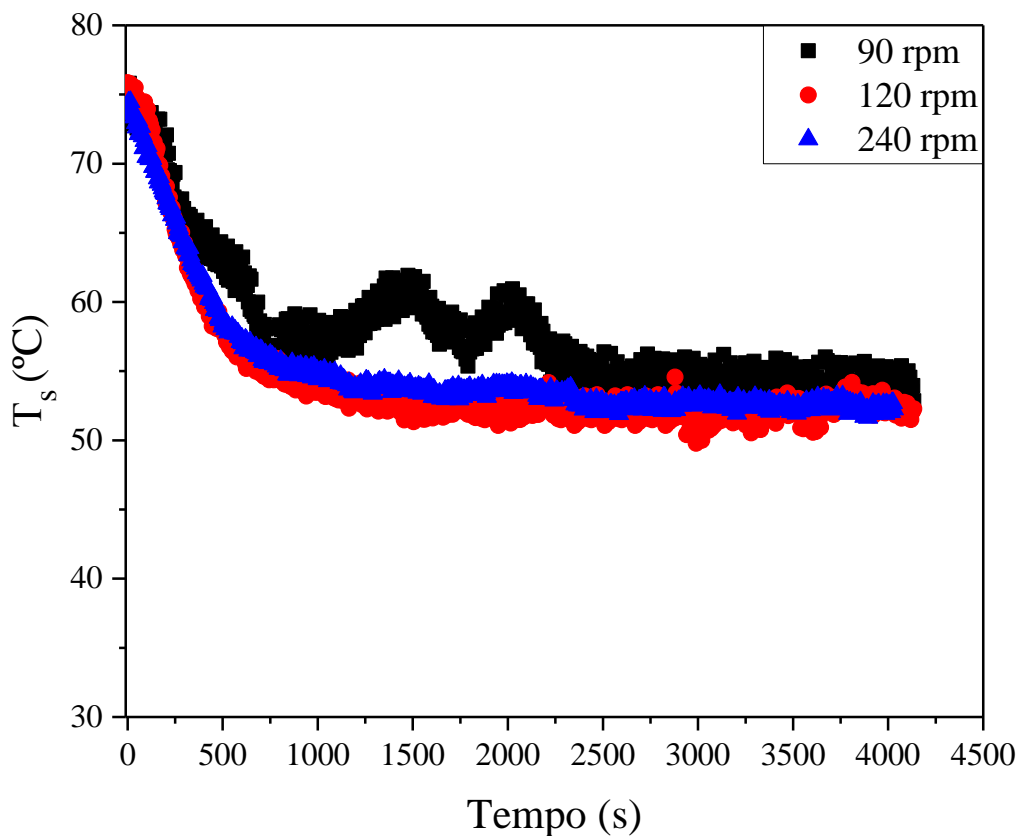
**Figura 4.34** – Umidade relativa em função do tempo de secagem para agitador de pás-retas. Dados: Secagem de carbonato de cálcio e vazão de ar de  $1,26 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .



Observa-se na Figura 4.34 que até uns 750s do início da injeção da pasta no leito não houve diferença entre as curvas, mas após esse período nota-se uma perturbação mais acentuada com a velocidade de rotação de 90rpm. Esse resultado pode ser devido a menor grau de agitação das partículas promovida por essa condição, fato esse já discutido em outras secções. Pode-se afirmar também que nesse período de regime transiente, a baixa UR sugere que não está ocorrendo a remoção da umidade de forma semelhante as demais condições, indicando um acúmulo de produto dentro do leito. Apesar desse resultado, próximo dos 2400s as três condições atingem um regime permanente, onde não se observa perturbações e instabilidade no processo.

**Figura 4.35** – Temperatura do ar na saída em função do tempo de secagem para agitador de pás-retas.

Dados: Secagem de carbonato de cálcio e vazão de ar de  $1,26 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .



A semelhança entre as curvas de 120 e 240 rpm pode ser devido ao fato de que nessa faixa de rotação o benefício causado pela rotação já atingiu seu grau máximo, como explicado anteriormente. Assim como existe um limite para redução da vazão de ar em função do aumento da velocidade de rotação, também pode haver um limite para a capacidade de secagem. Resultados análogos já foram observados por Reyes e Vidal

(2000), onde uma capacidade máxima é atingida para uma determinada velocidade de rotação do agitador mecânico no leito de jorro.

Em relação à temperatura do ar na saída do leito (Figura 4.35), nota-se que a condição com menor velocidade de rotação (90 rpm) apresentou maior temperatura do ar na saída do leito no regime transiente. Assim como na UR, esse fato indica o menor aproveitamento do ar de secagem. Também foram observadas instabilidades no início do processo, mas após 2400 s um regime permanente foi alcançado. Para as demais velocidades de rotação (120 e 240 rpm), nota-se um comportamento semelhante e um processo estável é alcançado próximo de 1500 s.

De modo geral, verificou-se que o aumento da velocidade de rotação trouxe benefícios para o processo de secagem. Resultado este condizente com a literatura, onde Bait et al. (2011) verificaram que existe uma tendência positiva no que diz respeito ao aumento da velocidade de agitação, sendo que quanto maior a velocidade de agitação, maior a taxa de secagem. Além disso, o aumento da velocidade de rotação influencia diretamente na movimentação das partículas no interior do leito, sendo uma grande vantagem em processos utilizado pastas com características físicas diferentes.

#### **4.7.4 Efeito da pasta sobre o leito de jorro com agitador mecânico**

Os resultados anteriores apontam que as características da pasta influenciam no comportamento do processo, principalmente em relação a cinética de secagem e aos possíveis problemas que podem causar sua interrupção. Desta forma, para analisar o efeito do tipo de pasta no processo de secagem, uma comparação entre diferentes tipos de pasta foi realizada. Para isso, foi utilizado água (pasta ideal), carbonato de cálcio (suspensão) e leite desnatado (pasta real). Esses testes foram realizados utilizando a vazão de ar necessária para o agitador ( $Q_{al}$ ) de pás-retas, uma vez que para o parafuso helicoidal houve problemas operacionais e na configuração com pás-inclinadas não foi possível realizar a secagem com leite devido à baixa vazão de ar necessária para agitar o leito. Sendo assim, os resultados para o agitador de pás-retas, com diferentes pastas, são apresentados nas Figuras 4.36 e 4.37.

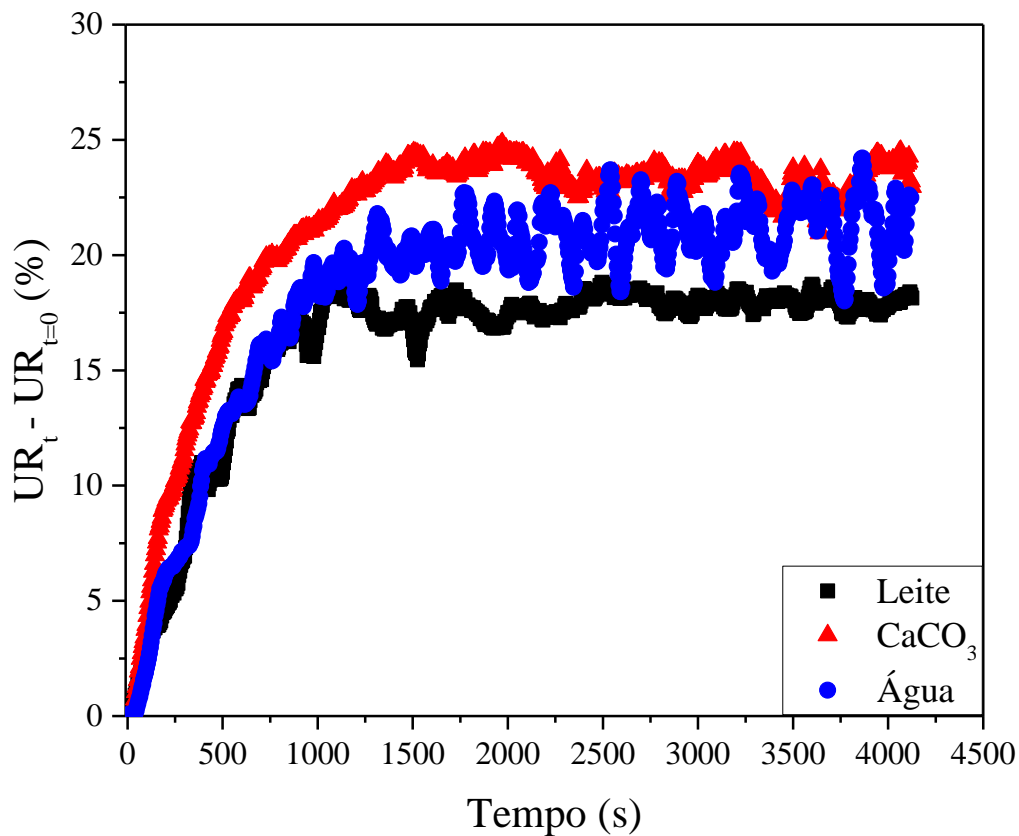
No processo de secagem, foi empregada a água como pasta ideal (branco). Desta forma, é possível ter uma ideia de como a composição das outras pastas afeta a cinética de secagem. No início do processo de secagem (Figura 4.36), as três pastas apresentaram aumento da UR em função no tempo de forma similar, até aproximadamente 500s, sendo



justificado devido a mesma vazão de pasta e condições operacionais de temperatura e vazão do ar. Posteriormente, a secagem de leite desnatado apresentou o menor valor da UR. Esse resultado pode estar relacionado com as características dessa pasta que pode dificultar a secagem da mesma e causando aglomeração e acúmulo no leite. Desta forma, a remoção da quantidade de água dessa pasta fica prejudicada, reduzindo assim a UR do ar na saída do equipamento.

Para o efeito da temperatura do ar, os resultados apresentaram redução em função do tempo de secagem, mas no equilíbrio os resultados foram similares, devido as condições operacionais serem iguais, tais resultados são observados na Figura 4.37.

**Figura 4.36** – Umidade relativa em função do tempo de secagem para agitador de pás-retas. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de  $1,26 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .

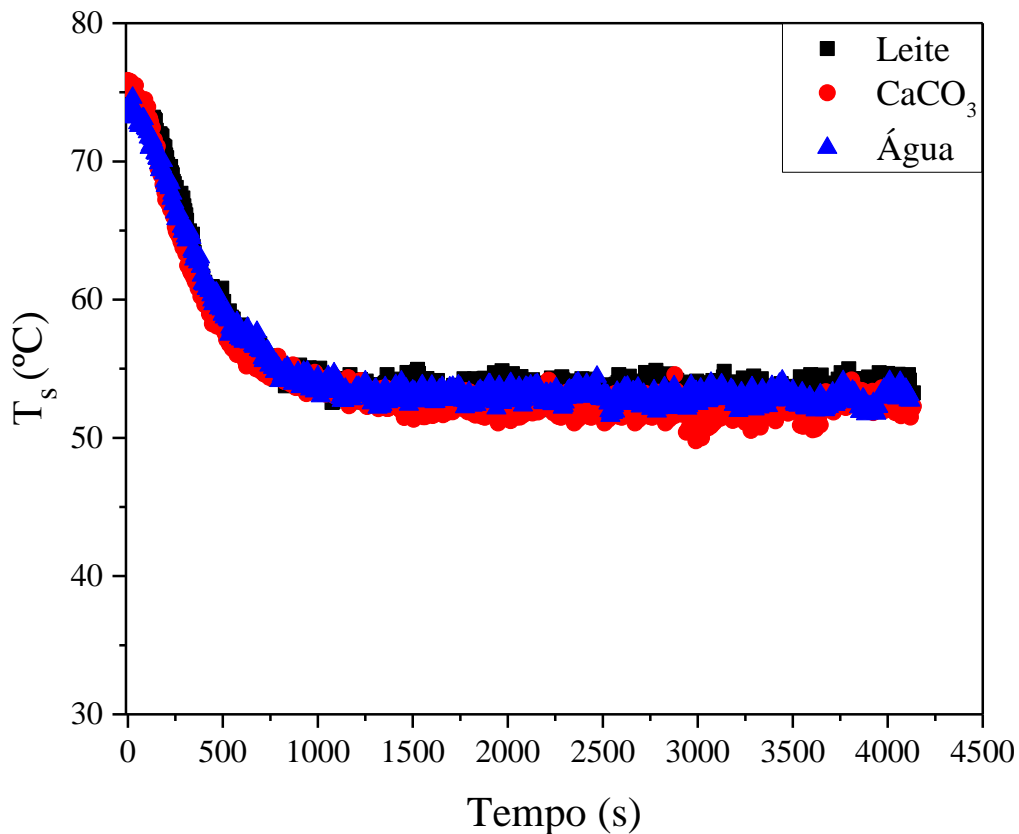


Conforme observa-se na Figura 4.36, a umidade relativa para as três pastas avaliadas tende a aumentar ao longo do processo até um valor máximo e posteriormente permanece constante, quando o regime permanente é alcançado. Um comportamento semelhante pode ser observado para a secagem do leite e do carbonato de cálcio, entretanto nota-se uma maior perturbação nos dados operacionais, mas apesar disso ambos apresentam o mesmo valor de UR no equilíbrio. Apesar do leite desnatado

apresentar maior complexidade química, com sua composição sendo resultado de uma mistura de gorduras, proteínas, sais, vitaminas e outros compostos, o resultado na cinética pode ser devido ao processo ocorrer em uma faixa afastada da capacidade máxima. Essa maior margem favorece um processo mais estável, mesmo com diferentes tipos de substâncias alimentadas no leito.

**Figura 4.37** – Temperatura do ar na saída em função do tempo de secagem para agitador de pás-retas.

Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de  $1,26 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .



Apesar dos resultados mencionados anteriormente, estudos da literatura relatam o efeito da característica da pasta no processo de secagem em LJC, sendo que quanto maior a sua complexidade e principalmente a quantidade de gordura presente, maior seria o aproveitamento do potencial de secagem do ar, elevando a UR do processo (NASCIMENTO; FREIRE; FREIRE, 2013; SOUSA, 2017). Entretanto a concentração de açúcares tem um efeito inverso na UR, ocorrendo uma camuflagem da presença da gordura quando na presença de açúcares, como já relatado por Ochoa-Martinez, Brennan e Niranjana (1993). Mesmo assim, a presença desses compostos extras, como a gordura e açúcares, influenciam diretamente na movimentação das partículas dentro do leito, modificando outros parâmetros como a eficiência do processo de secagem

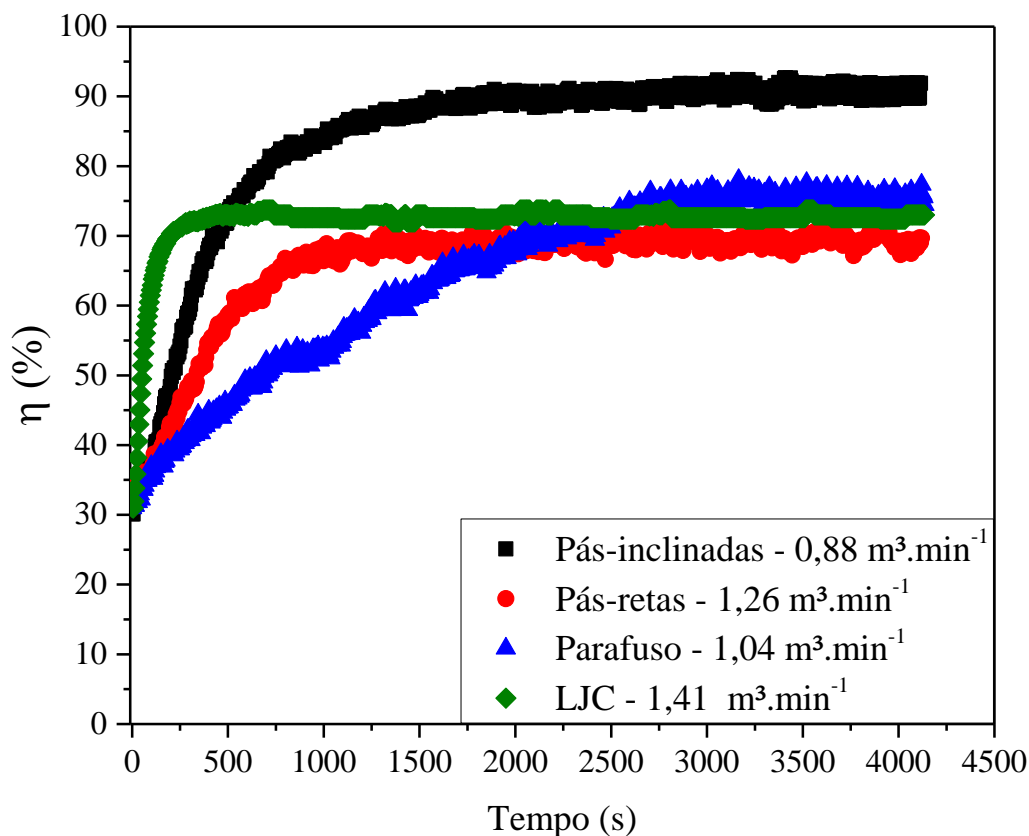
(FERNANDES, 2005; MEDEIROS et al., 2002; NASCIMENTO; FREIRE; FREIRE, 2013; OCHOA MARTINEZ; BRENNAN; NIRANJAN, 1993; REYES; HERRERA; VEGA, 2008; SOUSA, 2017).

#### 4.7.5 Análise energética da secagem em leito de jorro com e sem agitação

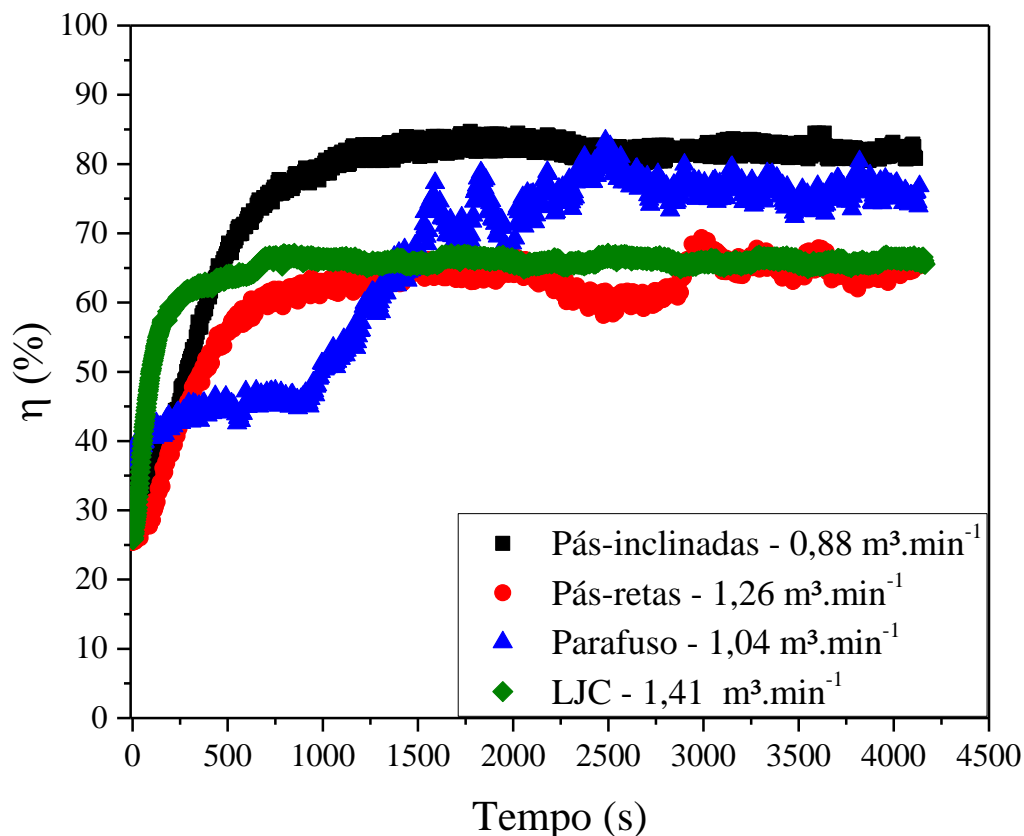
Com o objetivo de avaliar a eficiência térmica do processo de secagem ( $\eta$ ), foram utilizadas as temperaturas do ar discutidas na secção anterior e calculou-se a eficiência pela Equação 3.15. Esse parâmetro permite identificar a capacidade energética do leito de jorro, seja este com ou sem agitador mecânico, uma vez que tal parâmetro pode ser utilizado em qualquer secador convectivo (SOUSA, 2017).

As Figuras 4.38 a 4.40 apresentam os resultados calculados para a eficiência térmica do processo com diferentes composições da pasta alimentada, a Figura 4.38 (Água), a 4.39 (Carbonato de cálcio) e a 4.40 (Leite desnatado).

**Figura 4.38** – Eficiência térmica em função do tempo de secagem de água para diferentes configurações do leito de jorro. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm.



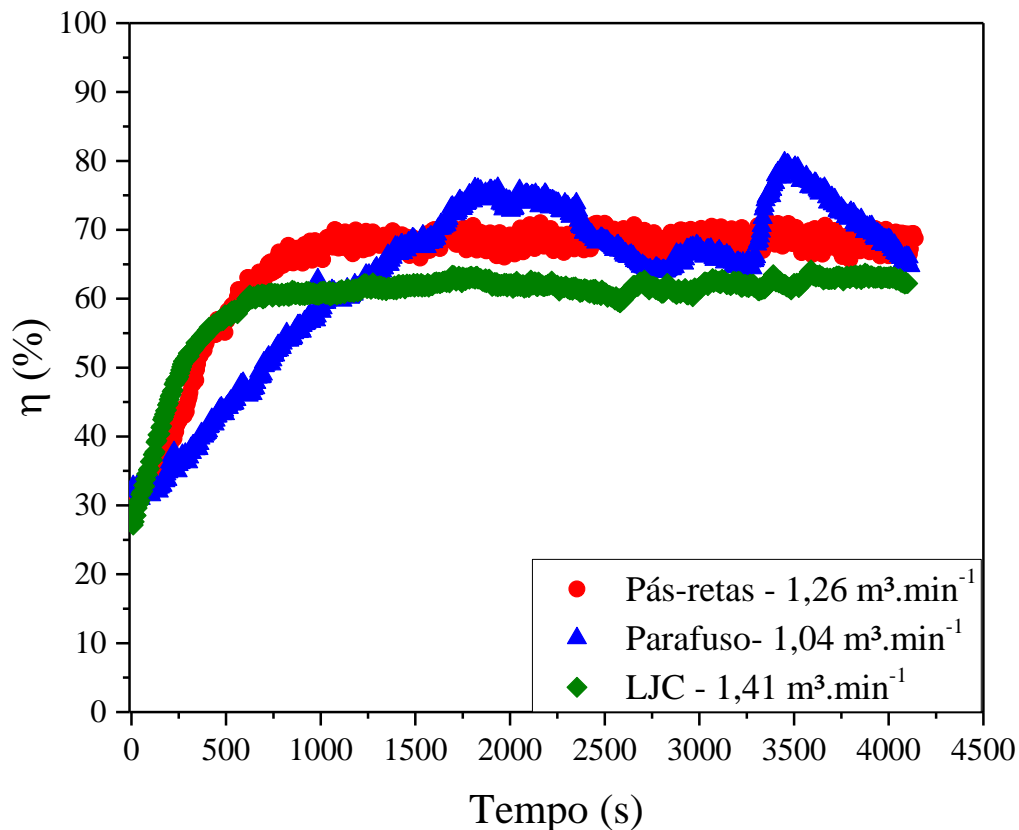
**Figura 4.39** – Eficiência térmica em função do tempo de secagem de carbonato de cálcio para diferentes configurações do leito de jorro. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de 0,88 (Pás-inclinadas), 1,26 (Pás-retas), 1,04 (Parafuso) e 1,41  $\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$  (LJC).



Apesar dos resultados apresentados na Figura 4.38, serem para uma pasta “ideal” (água destilada), os resultados servem como indicativo para comparar a eficiência térmica entre as diferentes configurações. Observa-se que o agitador de pás-retas, parafuso e o LJC apresentaram eficiência térmica no equilíbrio praticamente idênticos, mas durante o regime transiente houve uma diferença, já justificada anteriormente pela taxa de circulação das partículas e pela homogeneidade do leito. O regime permanente é onde ocorre a eficiência máxima do processo, sendo atingida primeiro pelo LJC e por último pelo agitador tipo parafuso helicoidal.

O agitador de pás-inclinadas obteve uma maior eficiência térmica no processo, devido ao melhor aproveitamento do ar de secagem. O valor da eficiência máxima para o agitador de pás-inclinadas foi aproximadamente de 90% (Figura 4.38), sendo 20% maior do que o LJC. Essa vantagem do agitador de pás-inclinadas se deve principalmente à menor vazão de ar utilizada no processo (0,88  $\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ ), uma vez que o aproveitamento da capacidade de secagem é maximizada.

**Figura 4.40** – Eficiência térmica em função do tempo de secagem de leite para diferentes configurações do leito de jorro. Dados: Velocidade de rotação de 120 rpm.



Na secagem de água, o LJC teve eficiência foi próxima de 70%, sendo esse valor condizente com os estudos da literatura (40-86%) (BARROS et al., 2019). Mas para o parafuso helicoidal nota-se que o valor também se aproxima de outros estudos, mesmo que a eficiência térmica possa variar com a vazão de pasta alimentada, vazão e temperatura do ar e vazão de pasta alimentada (SOUSA, 2017). Reyes e Vidal (2000) obtiveram eficiência de secagem entre 50-80% para mistura de carboidratos e 15-60% para poupa de maçã na secagem com agitador mecânico em leito de jorro (agitador cônico) e leito fluidizado (agitador de pás).

Para o processo de secagem com  $\text{CaCO}_3$ , os resultados são qualitativamente semelhantes para a secagem com água. O menor valor para eficiência foi observado no LJC e no agitador de pás-retas, sendo esses com valores próximos. Enquanto o agitador tipo parafuso helicoidal obteve um valor intermediário, como pode ser observado na Figura 4.39.

Em uma comparação quantitativa, nota-se que houve uma redução na eficiência de 90% (água) para 80% (carbonato de cálcio), sendo justificado pelas forças de interação presente na pasta. Esse resultado é condizente com os fenômenos físicos, uma vez que a

complexidade da pasta dificulta a remoção da água e também a movimentação das partículas, reduzindo dessa forma o aproveitamento do ar de secagem e conseqüentemente a capacidade de secagem. Para pastas mais complexas, como o leite desnatado, pode-se não ser possível realizar a secagem devido a essas forças de interação, como foi o caso do agitador de pás-inclinadas. Apesar desse resultado, os demais agitadores conseguiram realizar a secagem com leite desnatado, mesmo com alguma instabilidade, como apresentando na Figura 4.40.

Na Figura 4.40 nota-se uma perturbação no agitador tipo parafuso helicoidal devido a maior complexidade da pasta, entretanto a eficiência para esse agitador foi próxima de 65% (leite), 75% ( $\text{CaCO}_3$ ) e 75% (água). Para o agitador de pás-retas, a eficiência térmica foi próxima de 70% (leite), 65% ( $\text{CaCO}_3$ ) e 68% (Água). Enquanto para o LJC foi aproximadamente de 62% (leite), 66% ( $\text{CaCO}_3$ ) e 70% (Água).

Esses resultados sugerem que o LJC apresenta menor eficiência na secagem de leite do que o agitador mecânico. Dois fatores podem estar relacionados com essa observação: a vazão de ar utilizada pelo LJC é superior, reduzindo assim o aproveitamento do ar de secagem e conseqüentemente a eficiência do processo. Outro ponto a se considerar é o efeito do leite no leito de partículas, uma vez que após a formação de aglomerados e zonas mortas no LJC, estes dificilmente se desfazem, enquanto que no processo com agitação mecânica eles podem ser facilmente eliminados pelo contato direto com o agitador.

Apesar dos resultados apresentados para eficiência térmica, estudos da literatura com agitação mecânica relataram bons resultados na secagem com diversos materiais. Reyes et al. (2001), observaram que a incorporação da agitação mecânica na secagem de pastas em leito fluidizado ou de jorro aumentou significativamente a sua capacidade de secagem. Em outro estudo de Reyes e Vidal (2000), foi verificado que além da retenção de produtos no leito ser menor do que a observada na secagem sem agitação mecânica, notou-se também que a ação dos agitadores melhorou quantitativamente a agitação das partículas. Já para Puspasari et al. (2013), foi verificado que a agitação mecânica no leito ajudou a soltar o emaranhado das fibras que impede a passagem do ar através do leito de partículas. Ambrosio-Ugri e Taranto (2004), observou em um estudo com leito fluidizado agitado que este pode ser usado para a secagem de materiais com características coesivas, quando úmido, sem a ocorrência de caminhos preferenciais do gás e sem formação de aglomerados de partículas.

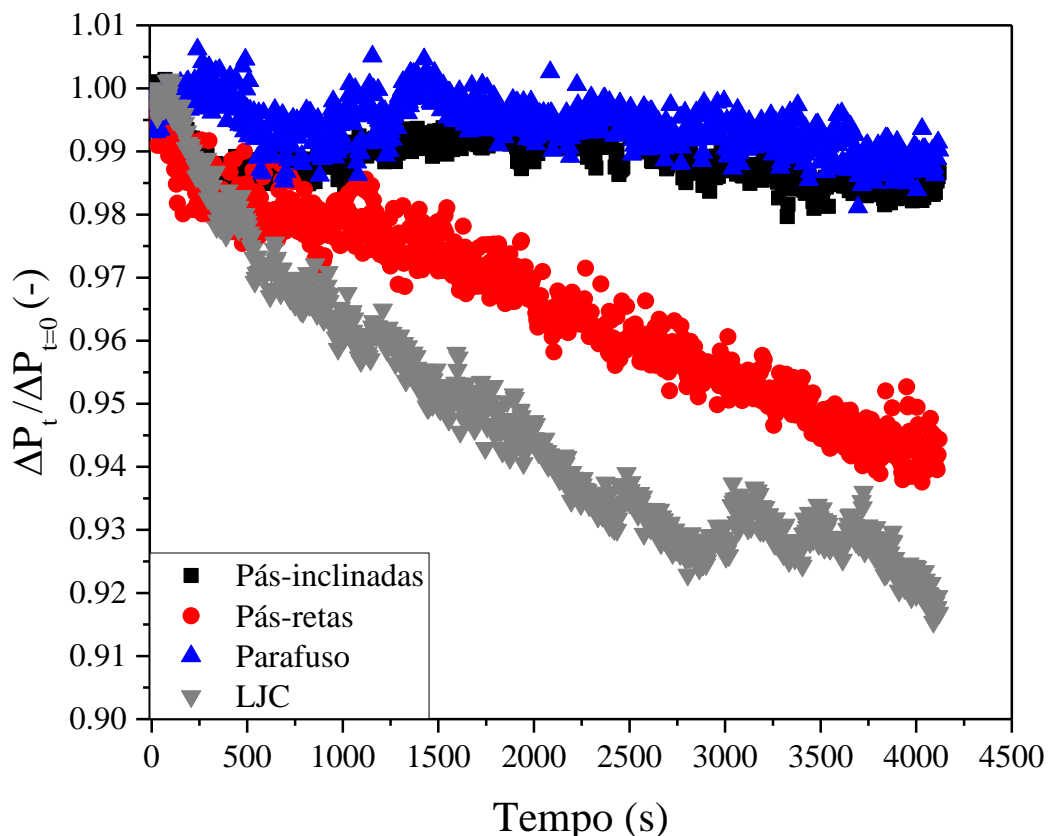
#### 4.7.6 Queda de pressão no leito de jorro

No que se refere ao adimensional da queda de pressão no leito, a Figura 4.41 apresenta os resultados para secagem de carbonato de cálcio para vazão de ar de  $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  nas quatro configurações do leito de jorro estudadas. Nota-se que os menores valores da queda de pressão foram observados para o leito de jorro convencional e em seguida para o agitador de pás-inclinadas, ficando por último o agitador de pás-retas e tipo parafuso. Como o experimento foi realizado com uma elevada vazão de ar ( $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ) e uma velocidade de rotação intermediária entre as estudadas, acredita-se que a contribuição para a movimentação das partículas pela vazão de ar é mais significativa do que a contribuição promovida pelo agitador mecânico. Entretanto, o “aparato” necessário para a configuração com agitador mecânico pode causar uma resistência extra para a contribuição da movimentação das partículas pela força ascendente proporcionada pela vazão de ar. Esses fenômenos reforçam a menor queda de pressão para o equipamento convencional e também o menor valor para o agitador de pás-inclinadas frente aos demais agitadores.

A redução da queda de pressão em função do tempo é condizente com a literatura, principalmente para o LJC, onde a redução na queda de pressão pode ter sido causada pelo fato da vazão do ar na região anular ser reduzida à medida que uma substância líquida ou pastosa é adicionada ao leito. Como consequência, ocorre uma canalização do ar para a região de jorro, reduzindo a queda de pressão global (ALMEIDA, 2009).

Em relação à secagem de leite empregando a mesma vazão de ar ( $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ), observa-se na Figura 4.42 um comportamento diferente da secagem com carbonato de cálcio. O equipamento convencional e o agitador parafuso helicoidal apresentaram comportamentos semelhantes na queda de pressão adimensional. Como o leite tem característica pegajosa, ele se acumula e aglomera, formando zonas mortas, principalmente próximo à parede do leito. Esse processo é mais comum no equipamento convencional e no agitador helicoidal, devido a movimentação próxima à parede ser baixa, facilitando esses problemas operacionais. Por isso a queda de pressão no início é maior e posteriormente reduz devido a passagem do ar ficar mais facilitada no centro do leito. O efeito das características físicas da pasta na queda de pressão já foi estudada por outros autores na secagem em leito de jorro convencional (ALMEIDA; FREIRE; FREIRE, 2010).

**Figura 4.41** – Queda de pressão adimensional no leito de jorro em função do tempo de secagem para diferentes configurações de agitadores e leito de jorro convencional. Dados: Vazão de ar de  $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ , velocidade de rotação de 120 rpm e carbonato de cálcio.

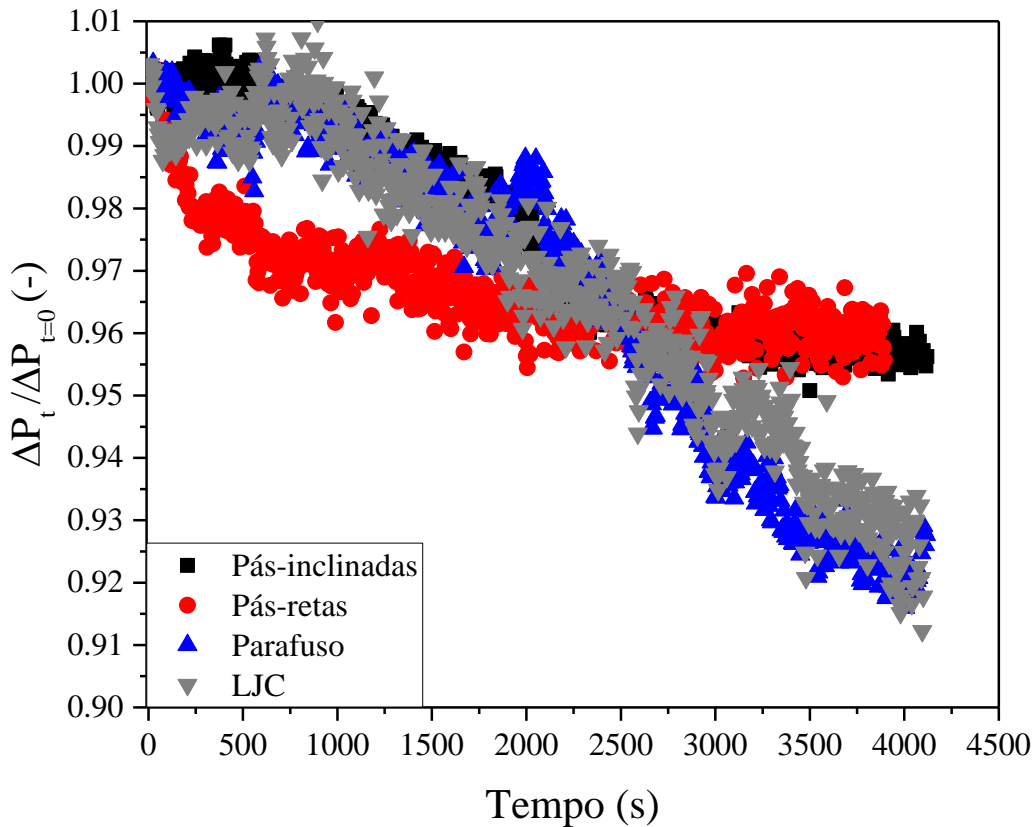


Para os demais agitadores (pás-inclinadas e pás-retas), estes comportam-se de forma semelhante, uma vez que ambas conseguem raspar próximo à parede do equipamento, evitando assim a formação de aglomerados e zonas mortas. Essas características já foram mencionadas por outros autores, na qual expõem as vantagens do uso dos agitadores mecânicos dentro do leito (AMBROSIO; TARANTO, 2002).

Na Figura 4.43, observa-se o adimensional da queda de pressão na secagem de carbonato de cálcio para diferentes configurações do leito de jorro, utilizando a vazão de ar baseado na fluidodinâmica. Nesse caso, o agitador de pás-inclinadas apresentou melhor resultado do que os demais agitadores. Esse resultado é condizente, uma vez que o agitador de pás-inclinadas apresenta uma melhor movimentação das partículas no leito, o qual facilita o escoamento do ar e tem uma menor queda de pressão. Além disso, o agitador tipo parafuso apresentou a menor redução na queda de pressão, sendo justificado pela movimentação mais central nessa configuração devido ao tipo e diâmetro do agitador empregado.



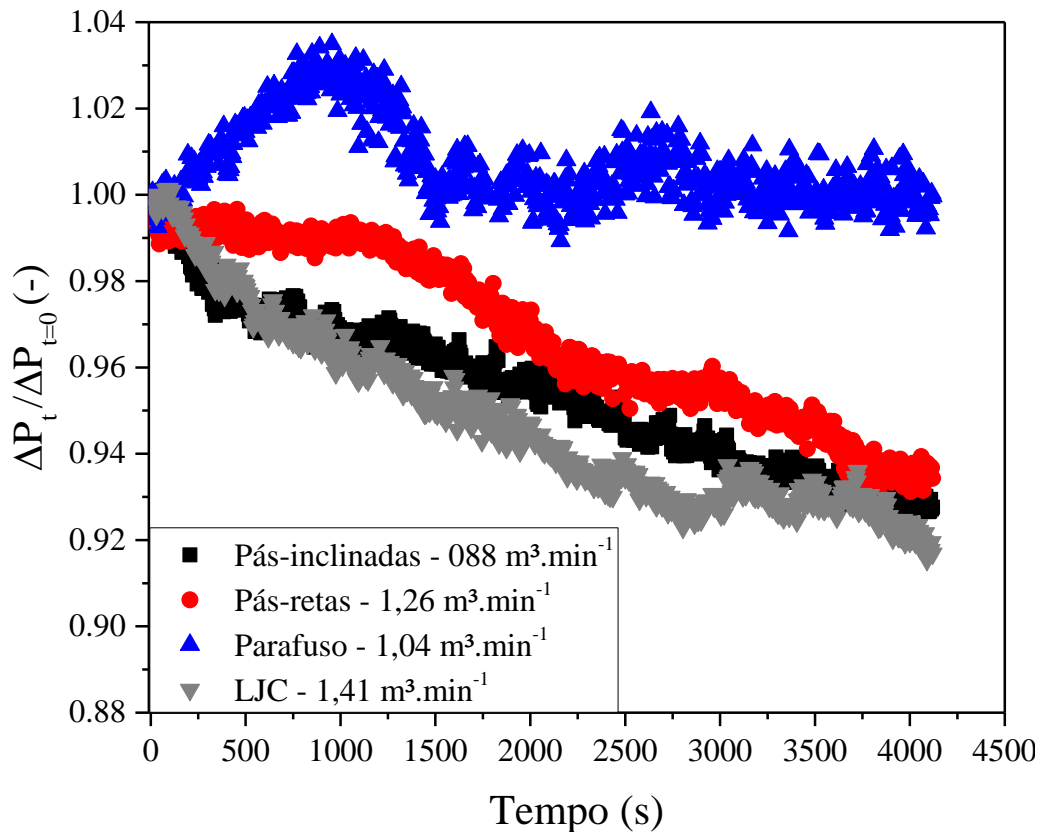
**Figura 4.42** – Queda de pressão adimensional no leito de jorro em função do tempo de secagem de leite para diferentes configurações de agitadores e leito de jorro convencional. Dados: Vazão de ar de 1,41 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup> e velocidade de rotação de 120 rpm.



Na Figura 4.43, observa-se que o LJC apresentou uma redução inferior aos demais agitadores, na secagem de carbonato de cálcio. Resultado esse também verificado na Figura 4.44 para secagem de leite desnatado. Esses resultados podem estar atrelados ao efeito de lubrificação para cada tipo de configuração. O efeito do tipo de pasta também pode ser notado pela brusca queda de pressão ocorrida pelo agitador tipo parafuso na Figura 4.44, uma vez que o leito desnatado apresenta características pegajosas.

Na Figura 4.45 é apresentada a secagem de leite para diferentes configurações, com exceção do agitador de pás-inclinadas. Esse último não foi possível de se realizar devido à baixa vazão de ar, como já mencionado anteriormente. Como consequência dos efeitos indesejáveis do acúmulo e aglomeração apresentados anteriormente na Figura 4.33, nota-se uma brusca redução da queda de pressão para o agitador tipo parafuso helicoidal. Devido à crosta formada no entorno da parede interna do leito de jorro, o escoamento de ar nessa região tornou-se impossível. Desta forma, o escoamento de ar foi completamente direcionado para o centro, canal preferencial, provocando uma redução na queda de pressão no leito.

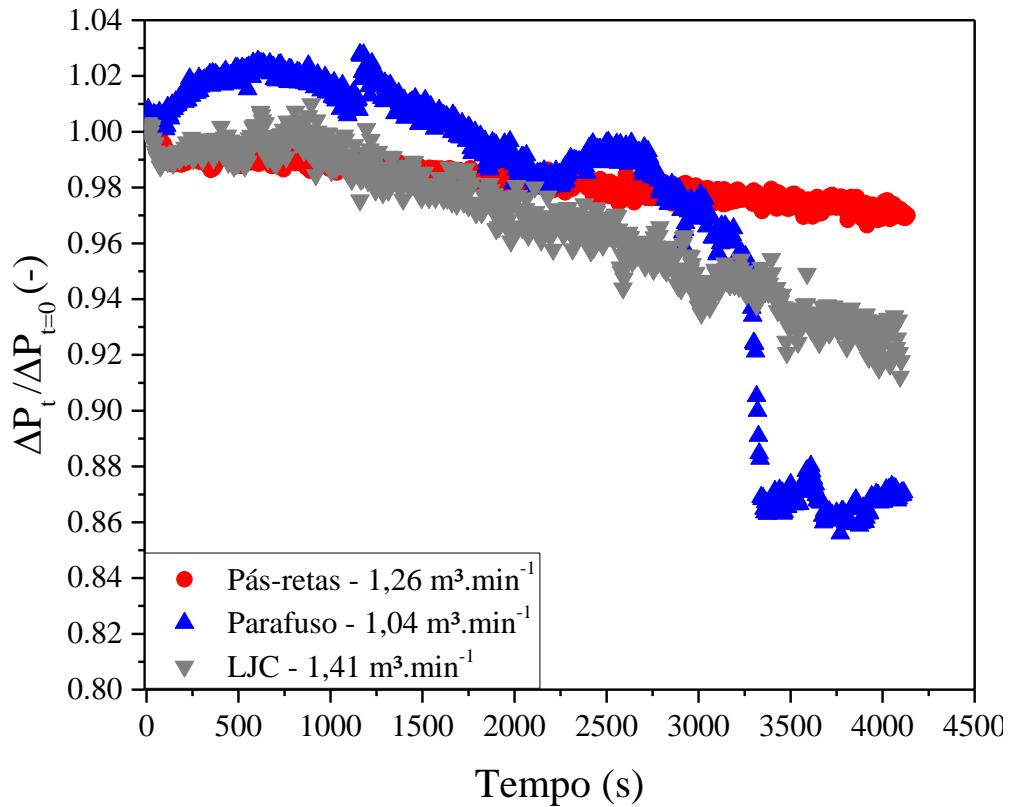
**Figura 4.43** – Queda de pressão adimensional no leito de jorro em função do tempo de secagem de carbonato de cálcio para diferentes configurações de agitadores e para o LJC.



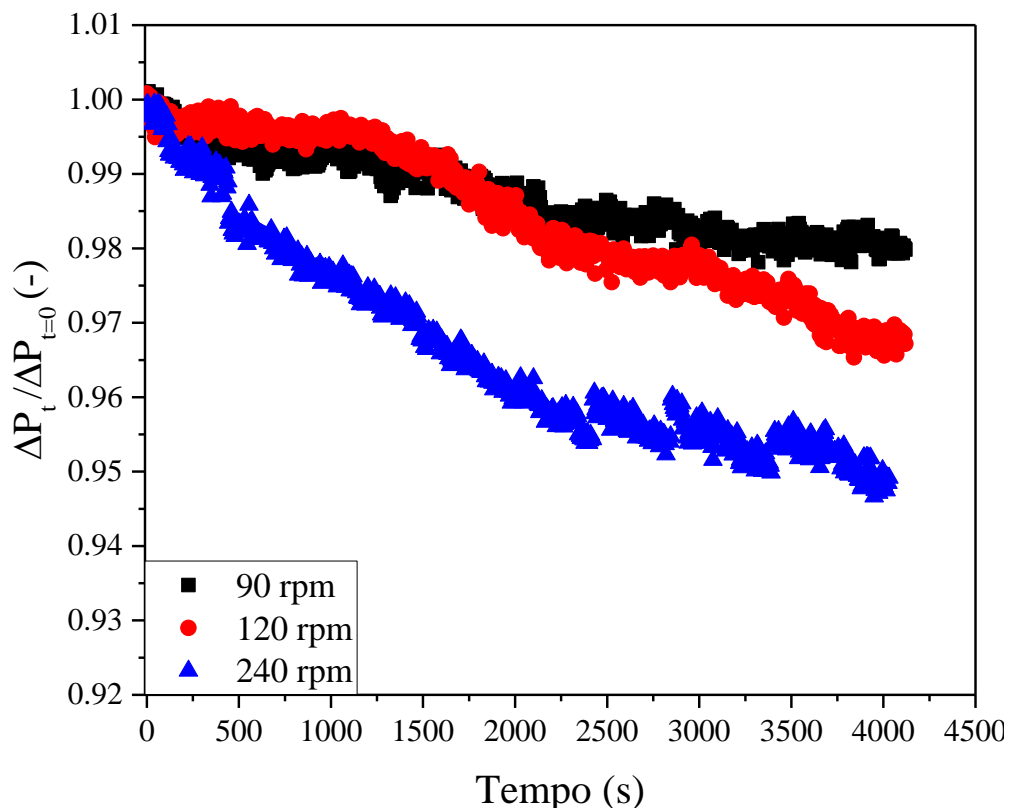
Para o agitador de pás-retas, o processo foi estável e com uma pequena redução da queda de pressão ao longo da secagem. Essa redução é definida de lubrificação das partículas, proporcionando uma melhora na movimentação do leito de partículas. Tal fenômeno também é observado no equipamento convencional (ALMEIDA et al., 2010), como já discutido anteriormente.

Os resultados apresentados na Figura 4.45 indicam que a maior velocidade de rotação do agitador, reduz a queda de pressão no leito, principalmente para 240 rpm. Esse resultado está em acordo com os dados já discutidos em tópicos anteriores, onde a maior rotação do agitador, melhora a movimentação das partículas facilitando o escoamento do ar de secagem. Esse fenômeno também pode ser uma desvantagem, uma vez que para 240 rpm ocorre a formação mais acentuada do canal preferencial no centro do leito (Figura 4.8), forçando o escoamento de ar por essa região. Isso tem vantagens na redução da queda de pressão, mas prejudica a secagem, reduzindo o tempo de contato com as partículas e prejudicando o potencial de secagem. Esse fato colabora com os resultados apresentados na Figura 4.34 e 4.35, onde na condição de 240 rpm não teve diferença significativa com 120 rpm para cinética de secagem.

**Figura 4.44** – Queda de pressão adimensional no leito de jorro em função do tempo de secagem de leite para diferentes configurações de agitadores.



**Figura 4.45** – Queda de pressão adimensional no leito de jorro em função do tempo de secagem de  $\text{CaCO}_3$  para diferentes velocidades de rotação. Dados: Pás-retas e vazão de ar de  $1,26 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .



#### 4.7.7 Umidade do produto

Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados em porcentagem para umidade do produto final em base úmida. Apesar de terem sido coletadas 7 amostras, com intervalo de 10 minutos cada, foi utilizada somente a última amostra coletada no ciclone como produto seco, aos 70 minutos de operação. A umidade do pó foi medida nesse período por ser uma condição de regime permanente, evitando efeitos do início do processo que poderiam afetar o seu valor final.

Observa-se pela Tabela 4.5, que o aumento da vazão de ar, para mesma velocidade de rotação (120 rpm), proporcionou uma redução na umidade do produto. Esse resultado ocorreu para os agitadores de pás-retas e parafuso, entretanto não foi observado tal efeito para pás-inclinadas. Esse resultado é coerente com os fenômenos físicos que ocorrem no processo de secagem, uma vez que devido a maior vazão de ar, a capacidade de secagem é aumentada, ou seja, ocorre maior remoção da água presente no filme na superfície das partículas inertes (PERAZZINI et al., 2017; SPITZER NETO; CUNHA; FREIRE, 2002). Apesar do aumento da vazão de ar reduzir a umidade do produto final, este tem um peso considerável no custo do processo, tanto pela maior capacidade do soprador, quanto do custo para aquecer a maior vazão de ar de secagem.

**Tabela 4.5** – Umidade do produto em base úmido (%) para diferentes condições operacionais no final do processo (70 minutos).

Umidade do produto base úmida (%)				
Agitador	$\Omega$ (rpm)	Vazão de ar ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	CaCO <sub>3</sub>	Leite
Pás-inclinadas	120	1,41	2,00±1,00	9,00±1,00
Pás-inclinadas	120	0,88	1,10±0,90	Instável
Pás-retas	120	1,41	0,70±0,60	11,20±0,90
Pás-retas	90	1,26	3,00± 1,00	-----
Pás-retas	120	1,26	2,00±1,00	7,00±3,00
Pás-retas	240	1,26	1,00± 0,20	-----
Parafuso	120	1,41	1,00±1,00	25,00±4,00
Parafuso	120	1,04	4,00±2,00	17,40±3,00
LJC*	---	1,41	0,70±0,50	2,00±1,00

\*Experimento realizado sem agitação (Leito de jorro convencional).

Na secagem com leite desnatado, nota-se que não foi possível obter nenhum resultado com o agitador de pás-inclinadas. Esse fato se deve aos problemas operacionais, principalmente devido à instabilidade que ocorre dentro do leito e conseqüentemente o fim do processo. Outro ensaio que teve problemas de instabilidade foi com o agitador tipo parafuso para a vazão de  $1,04 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  na secagem de carbonato de cálcio e leite desnatado, como já discutido anteriormente na cinética de secagem. Apesar da instabilidade foi possível realizar o processo, mas como pode ser observado na Tabela 4.5, as umidades do pó nessas condições foram mais elevadas do que nos demais experimentos, além de apresentar uma maior variação. A umidade do pó para o agitador tipo parafuso é condizente com os dados da literatura. Sousa (2017) obteve valores entre 12 e 22% na secagem com leite em diferentes condições operacionais. Quando empregado o mesmo tipo de agitador em leite de jorro, Szentmarjay, et al (1996) obtiveram umidade do produto entre 5,1 e 6,2%, mas com umidade inicial de 74% para secagem de concentrado de tomate.

Em comparação com as diferentes configurações de agitadores, para mesma vazão de ar, nota-se que para secagem de carbonato de cálcio não se verificou diferença entre os valores da umidade do produto. Podendo ser justificado pelo valor elevado do desvio padrão. Apesar desse resultado, para secagem de leite nota-se que o menor valor foi para o equipamento convencional, resultado este que poderia ser justificado pela maior elutrição do produto, porém mais estudos sobre esse tema ainda são necessários. Uma possível solução para que a umidade na secagem de leite seja menor no LJAM seria aumentar a velocidade de rotação, como já observado na secagem com carbonato de cálcio.

Além dos resultados da umidade, os produtos finais da secagem devem apresentar parâmetros de qualidade aceitáveis para serem comercializados ou para seus devidos fins. Um dos principais é a granulometria, uma vez que esse parâmetro afeta características como dispersabilidade e solubilidade. Para produtos como leite em pó, esse é um requisito importante sendo que o consumidor gostaria de solubilizar o pó de forma rápida e homogênea, sem formar aglomerados. Esse fator é influenciado pela granulometria do material, sendo que quando muito fino este pode não conseguir ultrapassar a tensão superficial da água ou meio na qual será feita a solubilização. Desta forma, o próximo tópico abordará as características das partículas em relação a sua granulometria.

## 4.8 Análise da granulometria do produto final

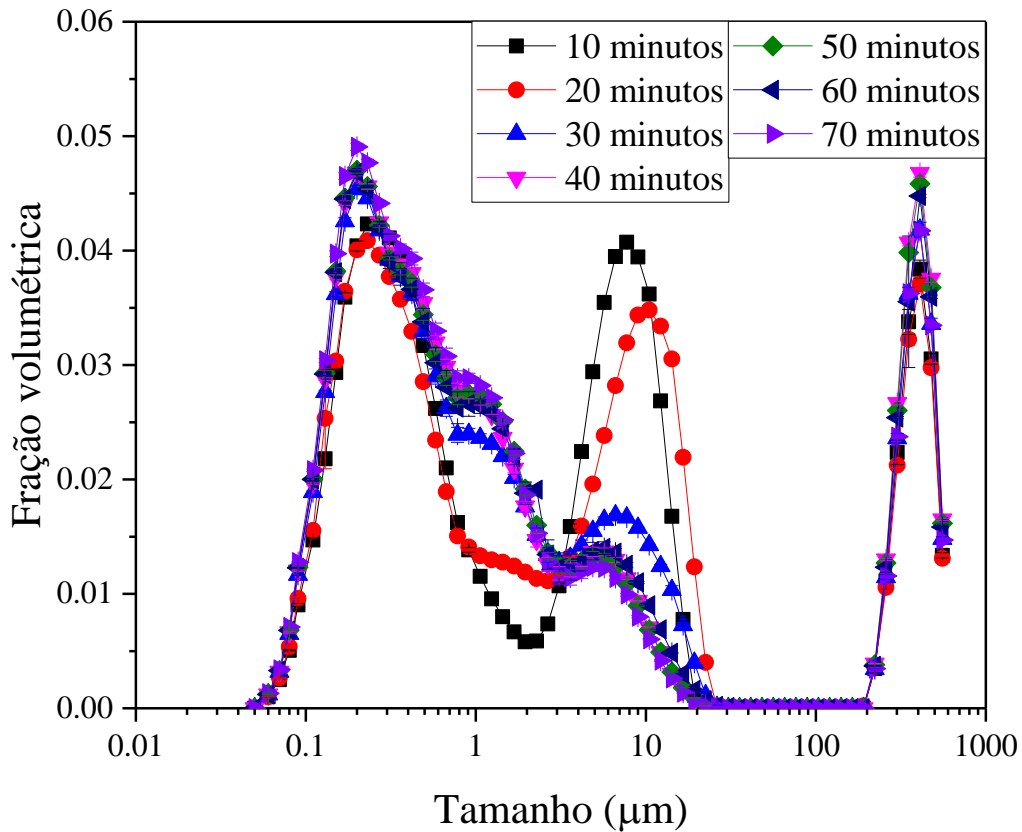
Para realizar a análise granulométrica, foram utilizadas amostras obtidas aos 60 minutos de operação. Esse procedimento foi realizado para minimizar possíveis erros provenientes da última coleta, como já discutido em trabalhos anteriores (BARROS, 2018). Apesar dessa condição específica, um estudo preliminar da granulometria em função do tempo de operação foi feito para analisar as variações do produto final.

Além da distribuição do tamanho das partículas em função da sua fração volumétrica, também foram analisados os dados do diâmetro  $d_{4,3}$  e  $d_{v50}$ . Outro parâmetro importante que foi analisado é o span, sendo um indicativo da amplitude da distribuição das partículas, ou seja, quanto menor o valor obtido de span, mais estreita a distribuição, indicando maior homogeneidade com relação ao tamanho das partículas (TEERANACHAIDEEKUL et al., 2007; SANTOS et al., 2012; BARROS, 2018). Esse indicativo, pode ser considerado como um índice de polidispersão, sendo o quanto do tamanho da partícula se desvia da média, calculada com base na Equação 3.17.

A Figura 4.46 apresenta o tamanho das partículas em escala logarítmica em função da fração volumétrica, para diferentes tempos de secagem (10, 20, 30, 40, 50, 60 e 70 minutos). A distribuição do tamanho das partículas não apresentou características de log-normal, verificando três picos (distribuição trimodal), mas observa-se que existem partículas em toda as faixas de tamanhos analisados (0,05 a 550  $\mu\text{m}$ ). Nota-se que nos instantes iniciais da secagem houve variação da granulometria do produto final, com um pico bem definido próximo dos 7-10  $\mu\text{m}$ . Além disso, observa-se na Tabela 4.6 que os diâmetros  $d_{4,3}$  e  $d_{v50}$  foram menores para os tempos de 10 e 20 minutos.

Para os valores de span, nota-se um aumento considerável entre a primeira e última coleta, próximo de 160%. Essas variações podem ser justificadas devido aos efeitos de recobrimento da superfície das partículas, uma vez que os primeiros ciclos de recobrimento, secagem e remoção do pó são diferentes dos demais. Nota-se que no regime transiente (10 e 20 minutos) a distribuição granulométrica é diferente dos demais períodos analisados (30, 40, 50, 60 e 70 minutos), enquanto que entre 30 e 70 minutos os resultados foram mais próximos. Sendo assim, pode-se afirmar que existe uma diferença mais significativa na distribuição do tamanho em função do tempo de operação, mas que a partir de 30 minutos, é atingindo um regime permanente para a distribuição granulométrica, confirmado que se pode utilizar a amostra coletada aos 60 minutos para as demais análises.

**Figura 4.46** – Tamanho das partículas em função da fração volumétrica para diferentes tempos de coleta do produto. Dados: Carbonato de cálcio, pás-retas, velocidade de rotação 120 rpm e vazão de ar de 1,26 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>.



**Tabela 4.6** – Tamanho das partículas e valor de span em função do tempo de secagem de carbonato de cálcio com pás-retas (120 rpm e 1,26 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>).

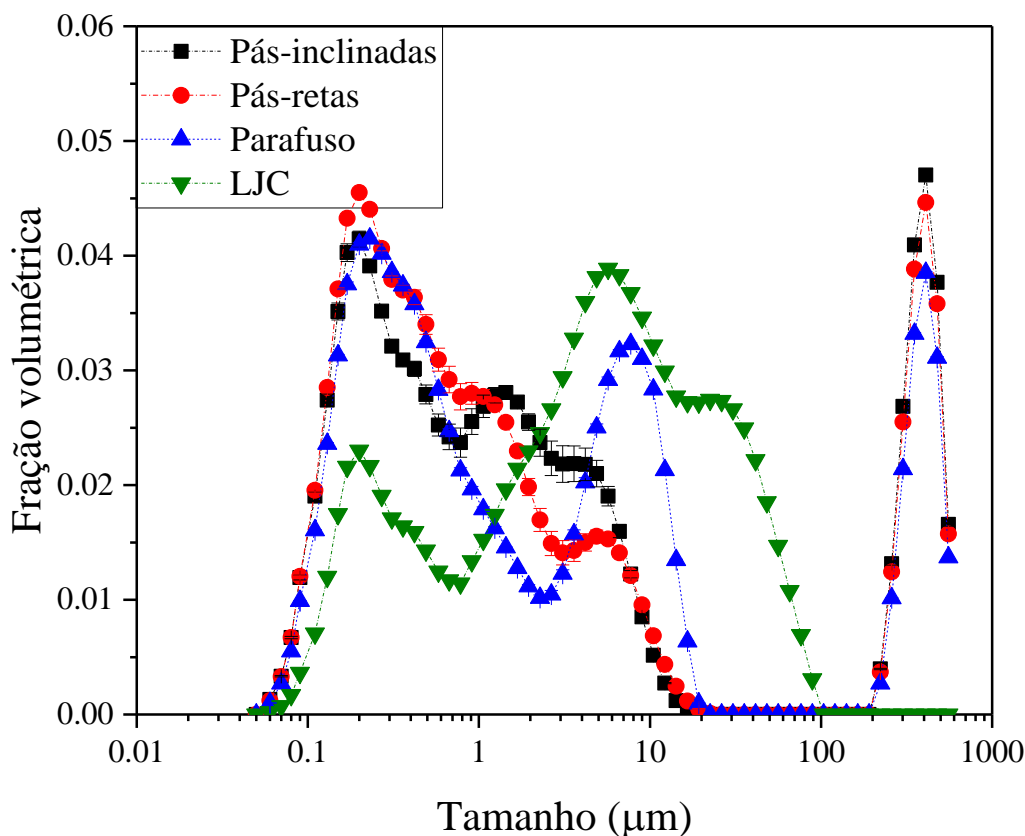
Tempo (minutos)	d <sub>4,3</sub>	d <sub>v50</sub>	Span
10	58,30±1,40 <sup>d*</sup>	1,50±0,20 <sup>a</sup>	220,00±20,00 <sup>e</sup>
20	56,80±0,80 <sup>d</sup>	1,63±0,05 <sup>a</sup>	197,00±5,00 <sup>e</sup>
30	61,90±0,90 <sup>c</sup>	0,76±0,03 <sup>b</sup>	450,00±10,00 <sup>a</sup>
40	68,60±0,50 <sup>a</sup>	0,67±0,02 <sup>b</sup>	530,00±10,00 <sup>cd</sup>
50	67,20±0,20 <sup>ab</sup>	0,67±0,02 <sup>b</sup>	520,00±20,00 <sup>d</sup>
60	65,70±0,30 <sup>b</sup>	0,69±0,03 <sup>b</sup>	319,00±7,00 <sup>b</sup>
70	61,20±0,30 <sup>c</sup>	0,60±0,02 <sup>b</sup>	570,00±10,00 <sup>c</sup>

\* ANOVA (p < 0,05) e teste de Tukey: Médias seguidas por uma letra diferente em uma determinada coluna são significativamente diferentes.

Na Figura 4.47 são apresentados os dados do tamanho das partículas em função da fração volumétrica para as diferentes configurações do leito de jorro estudadas. Foram

empregadas a mesma vazão de ar ( $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ) e para os equipamentos com agitação foi utilizada velocidade de rotação de 120 rpm.

**Figura 4.47** – Tamanho das partículas em função da fração volumétrica para diferentes tipos de agitadores mecânicos. Dados:  $\text{CaCO}_3$ , velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de  $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .



O agitador de pás-retas e o de pás-inclinadas apresentaram distribuição semelhantes, enquanto o agitador tipo parafuso apresentou um pico no tamanho de 10  $\mu\text{m}$ , que pode ser justificado pelo tipo de movimentação que ocorre dentro do leito. Essa justificativa também faz sentido quando se compara com o equipamento convencional, onde a distribuição foi diferente das demais, mesmo em condições similares de operação.

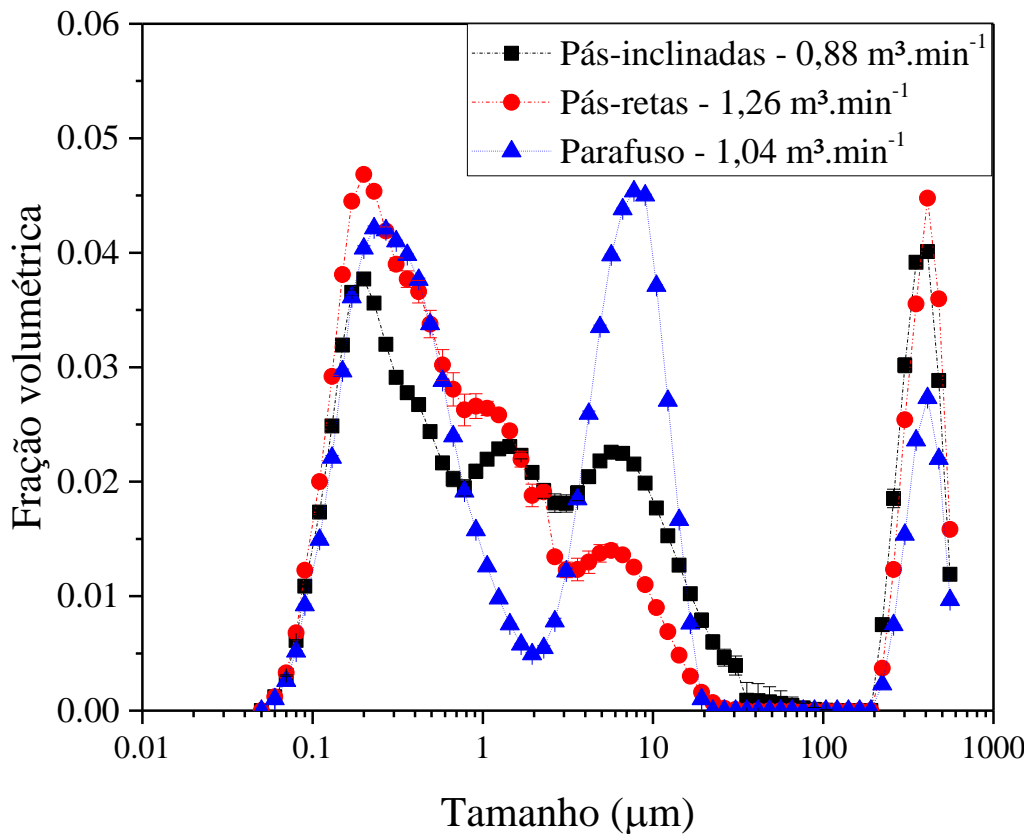
Em comparação com o equipamento convencional, nota-se que os agitadores apresentaram um pico entre 400 e 500  $\mu\text{m}$  (Figura 4.47). Esse resultado deve-se principalmente a dois fatores: o primeiro fator levado em consideração é o processo de aglomeração que ocorre dentro do leito e é influenciado pelo tempo de circulação das partículas. Quanto maior o tempo que o pó demora para ser elutriado, maior a chance de ele ser recoberto por uma nova camada de solução ou ainda que se aglomere, aumentando de tamanho. O segundo fator pode estar relacionado com a capacidade de elutriação do pó, a qual é influenciada pela velocidade de ar, pois seu aumento provoca uma maior



força de arraste sobre as partículas. Como a umidade do pó no equipamento convencional apresentou média inferior as demais configurações (Tabela 4.5), estes são facilmente elutriados e chegam como produto final com menor tamanho. Esse resultado é condizente com a literatura, no qual o aumento da umidade relativa no leito causa o aumento do tamanho da partícula de (BARROS, 2018; DACANAL; MENEGALLI, 2008).

Na Figura 4.48 foi feito uma análise do produto final para as diferentes configurações, mas com vazões de ar baseadas na suas respectivas fluidodinâmicas.

**Figura 4.48** – Tamanho das partículas em função da fração volumétrica para diferentes tipos de agitadores mecânicos com velocidade de rotação de 120 rpm. Dados: Carbonato de cálcio, pás-inclinadas, pás-retas e parafuso.

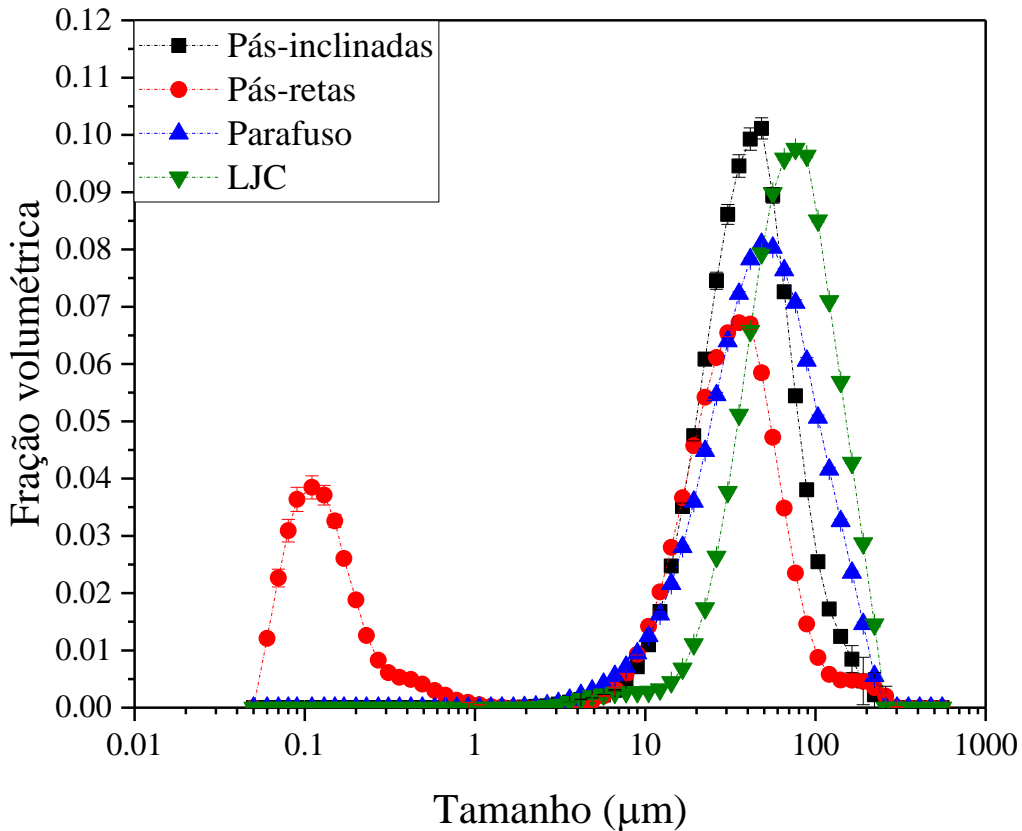


Na Figura 4.48 são apresentados os resultados para secagem de carbonato de cálcio empregando vazão de ar baseando na fluidodinâmica. Nota-se uma distribuição heterogênea e com uma fração de partículas mais acentuada próximo dos 10 µm para o agitador tipo parafuso helicoidal, com uma distribuição trimodal. Para essa condição, foram observadas perturbações nos dados da secagem, como já discutido anteriormente.

Os resultados apresentados sugerem que as partículas podem se aglomerar durante a secagem, aumentando seu tamanho. Além disso, a distribuição granulométrica do pó

pode mudar em função do tipo de configuração do equipamento e também pelas condições operacionais. Esses fenômenos também podem acontecer na secagem de pastas mais complexas, como na secagem de leite desnatado apresentada na Figura 4.49.

**Figura 4.49** – Tamanho das partículas em função da fração volumétrica para diferentes tipos de agitadores mecânicos. Dados: Leite, velocidade de rotação de 120 rpm e vazão de ar de  $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .



Na Figura 4.49 são apresentados os dados para secagem com leite desnatado para as quatro configurações analisadas. Um comportamento diferente pode ser observado na secagem de leite em comparação com o carbonato de cálcio, sendo verificado uma distribuição mais homogênea, qualitativamente similar a uma curva gaussiana (ou curva normal). A distribuição granulométrica apresentada na Figura 4.49 pode ser considerada monomodal por apresentar somente um pico entre partículas de 70-90  $\mu\text{m}$ . Somente o agitador de pás-retas que apresentou um desvio e teve uma distribuição bimodal, com um pico adjacente próximo aos 0,12  $\mu\text{m}$ , podendo ser um erro experimental, na leitura do tamanho das partículas no equipamento ou devido a um aglomerado de partículas.

Com exceção desse segundo pico na curva de pás-retas, as distribuições granulométricas apresentadas na Figura 4.49 são similares aos resultados encontrados no estudo de Felfoul et al. (2020) na secagem de leite desnatado em *spray-dryer*. Os valores

de span ficaram entre 1,75 e 1,93, sendo equivalentes aos obtidos nesse estudo para a Figura 4.49. Os valores de span foram de 1,71 (pás-inclinadas), 2,67 (pás-retas), 2,13 (parafuso), 1,66 (LJC). Apesar da dispersão e da curva granulométrica serem similares ao estudo de Felfoul et al. (2020), os valores de  $d_{v50}$  foram maiores para as configurações desse estudos do que para o *spray-dryer*.

Além das características físicas da pasta, a distribuição das partículas também pode sofrer influência de outros fatores, como temperatura e vazão do ar, da umidade do pó, vazão de pasta, geometria do equipamento, composição da pasta, posição de atomização (DOTTO; SOUZA; PINTO, 2011; SOUZA; OLIVEIRA, 2005). Estas características alteram o tamanho das partículas e podem favorecer o processo de aglomeração. De tal forma, a influência das condições operacionais tem se mostrado de grande importância para o entendimento do processo aglomerativo. Além do mais, no estudo de Pallai et al. (2001) foi verificado que o tamanho de partícula do produto é controlado pelo comprimento do parafuso de transporte e pela sua velocidade de rotação, sendo esse último um dos mecanismos de fácil controle que pode ser utilizado para alterar o tamanho das partículas. Desta forma, foi realizada uma análise para identificar o efeito da velocidade de rotação em função da distribuição granulométrica do agitador de pás-retas, como apresentado na Figura 4.50.

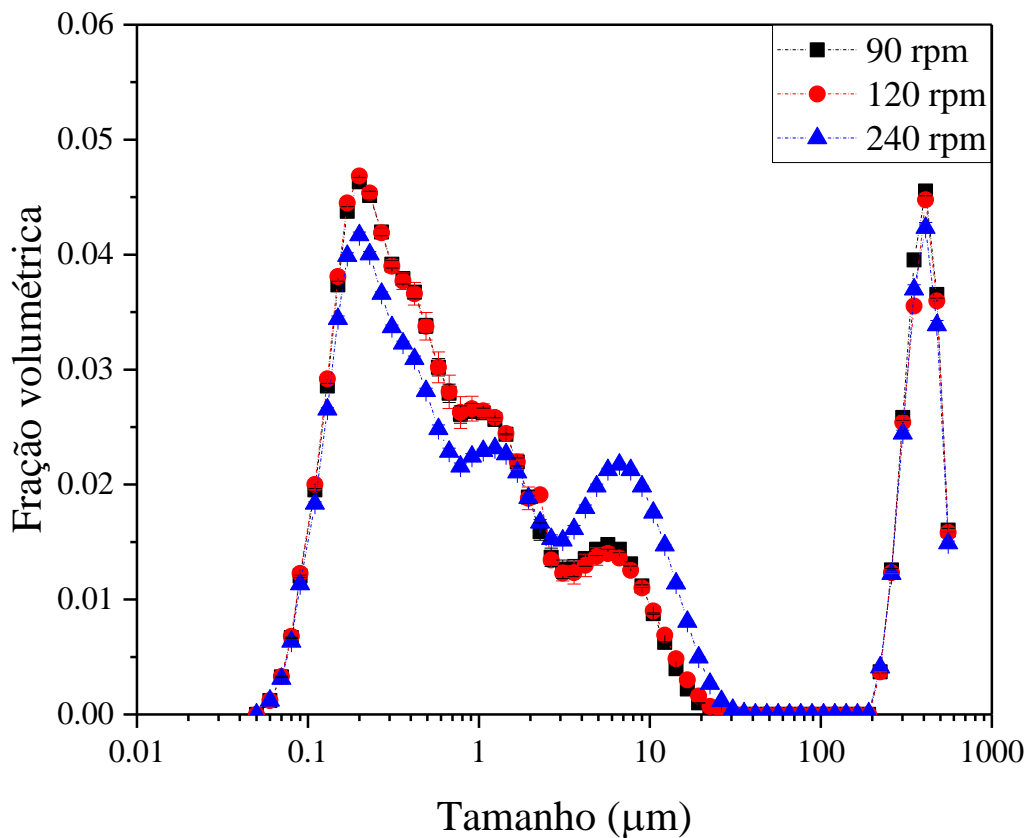
Os resultados apresentados na Figura 4.50 sugerem que não há diferença na distribuição do tamanho das partículas para velocidade de rotação de 90 e 120 rpm, entretanto para 240 rpm nota-se um aumento na fração das partículas de 10  $\mu\text{m}$ . Esse resultado sugere que em baixas e médias rotações não ocorrem variações significativas, mas para elevadas rotação pode-se esperar uma variação na distribuição do tamanho das partículas e conseqüentemente nos valores de span.

De modo geral, além da velocidade de rotação, outros parâmetros do processo têm efeitos na distribuição do tamanho das partículas e também na amplitude da distribuição, os quais afetam o diâmetro médio dessas partículas. De forma resumida, os valores de  $d_{v50}$ ,  $d_{4,3}$  e span foram organizados nas Tabelas 4.7 e 4.8 para secagem de carbonato de cálcio e leite, respectivamente.

Uma análise inicial sobre os dados da Tabela 4.7 (carbonato de cálcio) pode ser feita em comparação com a amostra inicial utilizada para preparar a suspensão que foi alimentada no leito de jorro (com e sem agitação mecânica). Foi verificado que na distribuição granulométrica desse material inicial não existia fração das partículas superiores ao tamanho de 10  $\mu\text{m}$ . O valor de  $d_{4,3}$  foi de  $2,53 \pm 0,04 \mu\text{m}$ . Desta forma,

pode-se concluir ao observar os dados da Tabela 4.7, que independente da condição empregada, houve um aumento considerável no tamanho dessas partículas. Esse resultado sugere que entre o processo de formação do filme na superfície do inerte e remoção do pó por elutriação ocorre uma aglomeração que aumenta o tamanho das partículas iniciais. Uma análise mais detalhada com a distribuição granulométrica dessa amostra inicial já foi estudada em trabalhos anteriores (BARROS, 2018).

**Figura 4.50** – Tamanho das partículas em função da fração volumétrica para diferentes velocidades de rotação do agitador. Dados: CaCO<sub>3</sub> e pás-retas (1,26 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>).



Os valores obtidos para o diâmetro das partículas são condizentes com a literatura para secagem de suspensões e soluções. Na secagem em leito de jorro mecânico utilizando agitador tipo parafuso, foi obtido tamanho médio das partículas de 1,86 μm ( $d_{v50}$ ) na secagem de uma suspensão de AlO(OH) (SZENTMARJAY, 1995). Para pastas mais complexas, como a secagem de leite desnatado apresentados na Tabela 4.8, estes também são condizentes com a literatura para outras pastas. No estudo de Reyes et al (2007) com leito fluidizado pulsado, as partículas de carboidrato, apresentaram diâmetro médio de 167 μm, enquanto para os ovos secos foi de 546 μm. Enquanto que no estudo de Ambrosio e Taranto (2002) utilizando leito fluidizado agitado mecanicamente, foi

obtido diâmetro médio de aproximadamente 80  $\mu\text{m}$ , no processo de secagem de ácido 2-hidroxibenzóico. Em comparação com a configuração convencional, Braga e Rocha (2013) obtiveram tamanho da partícula de  $84,83 \pm 4,58 \mu\text{m}$ , na secagem de mistura pastosa de leite e polpa de amora.

**Tabela 4.7** – Tamanho das partículas para diferentes tipos de agitadores na secagem de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

Agitador	Q ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	$\Omega$ (rpm)	$d_{4,3}$	$d_{v50}$	Span
Pás-retas	1,26	90	$0,70 \pm 0,03^{\text{b}*}$	$66,80 \pm 0,70^{\text{b}}$	$500,00 \pm 20,00^{\text{b}}$
Pás-retas	1,26	120	$0,69 \pm 0,03^{\text{b}}$	$65,70 \pm 0,30^{\text{b}}$	$500,00 \pm 20,00^{\text{b}}$
Pás-retas	1,26	240	$1,07 \pm 0,03^{\text{a}}$	$63,40 \pm 0,70^{\text{a}}$	$319,00 \pm 7,00^{\text{a}}$
Pás-retas	1,41	120	$0,72 \pm 0,03^{\text{B}}$	$65,50 \pm 0,30^{\text{B}}$	$482,00 \pm 15,00^{\text{A}}$
Pás-inclinadas	1,41	120	$1,02 \pm 0,07^{\text{C}}$	$69,10 \pm 0,70^{\text{A}}$	$350,00 \pm 22,00^{\text{C}}$
Parafuso	1,41	120	$1,00 \pm 0,03^{\text{C}}$	$57,40 \pm 0,20^{\text{C}}$	$325,00 \pm 7,00^{\text{C}}$
LJC	1,41	-	$4,40 \pm 0,20^{\text{A}}$	$10,00 \pm 0,20^{\text{D}}$	$6,90 \pm 0,40^{\text{B}}$
Pás-retas	1,26	120	$0,69 \pm 0,03^{\text{3}}$	$65,70 \pm 0,30^{\text{1}}$	$500,00 \pm 20,00^{\text{1}}$
Pás-inclinadas	0,88	120	$1,49 \pm 0,04^{\text{1}}$	$63,80 \pm 0,30^{\text{2}}$	$220,00 \pm 5,00^{\text{2}}$
Parafuso	1,04	120	$1,10 \pm 0,03^{\text{2}}$	$42,10 \pm 0,20^{\text{3}}$	$228,00 \pm 5,00^{\text{2}}$

\*ANOVA ( $p < 0,05$ ) e teste de Tukey: Para o mesmo agitador com diferentes velocidades de rotação (letras minúsculas), para diferentes configurações com a mesma vazão de ar (letras maiúsculas) e diferentes agitadores com diferentes vazões de ar (números).

**Tabela 4.8** – Tamanho das partículas para diferentes tipos de agitadores na secagem de leite desnatado.

Agitador	Q ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	$\Omega$ (rpm)	$d_{4,3}$	$d_{v50}$	Span
Pás-inclinadas	1,41	120	$37,10 \pm 0,60^{\text{c}*}$	$44,00 \pm 2,00^{\text{c}}$	$1,71 \pm 0,09^{\text{c}}$
Pás-retas	1,41	120	$20,90 \pm 0,60^{\text{d}}$	$26,50 \pm 0,90^{\text{d}}$	$2,76 \pm 0,02^{\text{a}}$
Parafuso	1,41	120	$44,50 \pm 0,30^{\text{b}}$	$54,80 \pm 0,30^{\text{b}}$	$2,13 \pm 0,01^{\text{b}}$
LJC	1,41	-	$64,77 \pm 0,06^{\text{a}}$	$73,72 \pm 0,05^{\text{a}}$	$1,66 \pm 0,01^{\text{c}}$
Pás-retas	1,26	120	$20,00 \pm 0,30^{\text{B}}$	$23,20 \pm 0,40^{\text{B}}$	$2,67 \pm 0,04^{\text{B}}$
Parafuso	1,04	120	$53,30 \pm 0,80^{\text{A}}$	$69,00 \pm 2,00^{\text{A}}$	$2,42 \pm 0,04^{\text{A}}$

\*ANOVA ( $p < 0,05$ ) e teste de Tukey: Para diferentes configurações com a mesma vazão de ar (letras minúsculas) e para diferentes agitadores com diferentes vazões de ar (letras maiúsculas).

De modo geral, nota-se que a distribuição granulométrica é afetada tanto pela configuração dos agitadores, quanto pela velocidade de rotação. Esses resultados são importantes para conseguir projetar e também empregar a melhor condição operacional para atingir os objetivos do processo. Além disso, como já se sabe da literatura, as características da pasta afetam o tamanho das partículas devido as forças que possam atuar sobre o processo de formação do produto final. Outro aspecto que pode ser levado em consideração é o formato do pó gerado, sendo que no caso do leite de jorro convencional, estudos já indicam que o produto gerado em leite de jorro, apresenta normalmente geometria na forma de flocos irregulares e achatados (PHAM, 1983). Enquanto para o leite agitado mecanicamente, no estudo de Ambrosio e Taranto (2002) foi verificado que os sólidos secos apresentavam forma de agulhas para os sólidos secos em leite fluidizado. Apesar desses resultados, ainda são resultados preliminares para a geometria do produto final, sendo necessários mais estudos para uma análise completa desse parâmetro.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo destacam o leito de jorro com agitação mecânica como uma alternativa promissora para superar dificuldades que são encontradas no equipamento convencional. Esse equipamento modificado desempenha um papel fundamental tanto na vazão de ar, quanto na queda de pressão operacional e na queda de pressão máxima, sendo esses parâmetros diretamente relacionados ao custo energético. Nesse estudo foram empregadas diferentes configurações de agitadores, os quais foram comparados com o equipamento convencional.

A inserção dos agitadores no leito de partículas proporcionou melhorias nos parâmetros fluidodinâmicos e nas condições operacionais do equipamento, como a maior estabilidade do leito, a redução da queda de pressão e principalmente redução da vazão de ar. Ao se utilizar os agitadores de pás-retas e pás-inclinadas, foi observada uma redução da vazão de ar em função do aumento da velocidade de rotação, sendo o agitador de pás-inclinadas o que apresentou os melhores resultados. Em contrapartida, a influência da inclinação das pás na fluidodinâmica foi minimizada para velocidades de rotação acima de 240 rpm. Apesar do agitador tipo parafuso helicoidal ter apresentado os piores resultados, foi possível operar com vazões de ar menores do que o equipamento convencional em algumas condições. O aumento do número de pás do agitador resultou na redução da vazão de ar em comparação ao equipamento convencional, além disso para todas as condições com o maior número de pás foi possível melhorar a estabilidade no leito, evitando fenômenos como o leito borbulhante.

Os diferentes grupos de partículas analisados apresentaram resultados diferentes principalmente para os ensaios com partículas não esféricas. Para o agitador de pás-inclinadas foi observada uma redução linear da vazão de ar necessária para agitar o leito, obtendo redução máxima de 66%, para uma velocidade de rotação de 240 rpm. Em relação às quedas de pressão operacional e máxima, esse agitador também apresentou os menores resultados.

Além disso, as propriedades das partículas e a massa de partículas no leito também são parâmetros-chave para um design apropriado do agitador. Modelos empíricos foram obtidos para a velocidade mínima de jorro e a queda de pressão máxima, obtendo previsões satisfatórios, enquanto o modelo proposto para a queda de pressão operacional ainda exige mais estudos. Apesar dos resultados promissores, a comparação entre a configuração convencional e a mecânica indica que o melhor desempenho deste último é

condicionado principalmente pela rotação do agitador, uma vez que a baixa rotação do agitador pode fornecer resultados inviáveis em relação ao convencional.

Em relação ao perfil de velocidade do ar, este é uma função da velocidade de rotação e da geometria do agitador, sendo que o agitador de pás-inclinadas conseguiu atingir perfil similar ao equipamento convencional em faixas específicas. Para o tempo de ciclo das partículas, os resultados indicam que independente da geometria do agitador, a velocidade de rotação tem maior efeito do que a vazão de ar. A presença do agitador mecânico no leito também influenciou na secagem de pastas e soluções, principalmente em relação à estabilidade operacional, sendo que não existe o fenômeno de colapso do jorro como ocorre no equipamento convencional, independentemente do tipo de pasta empregada. Apesar desses resultados, o agitador de tipo parafuso apresentou alguns resultados adversos devido à sua pouca capacidade de mistura no leito em comparação com os demais agitadores. Em relação às propriedades do produto final, a velocidade de rotação e a geometria do agitador afetam tanto a umidade como também a distribuição granulométrica, sendo que a distribuição pode ser controlada através da velocidade de rotação do agitador.

Os resultados apresentados neste estudo evidenciaram os efeitos da geometria, da velocidade de rotação do agitador e da vazão de ar no comportamento do leito de jorro com agitação mecânica. Assim como em outros equipamentos, a adição do agitador no leito de jorro proporcionou vantagens significativas ao equipamento. Isso pode ter implicações favoráveis em diversas operações, o qual permite expandir suas aplicações para maiores escalas. Problemas como a elevada queda de pressão, instabilidade no leito, aglomeração e acúmulo de produto no leito podem ser minimizados, podendo também reduzir os custos operacionais devido à redução da vazão de ar necessária para operar o equipamento. Os resultados e discussões desse estudo vão ajudar no melhor entendimento da movimentação das partículas dentro do leito e poderão contribuir e incentivar o desenvolvimento de trabalhos futuros mais específicos, até mesmo para outros equipamentos que utilizem processos similares, além de outras aplicações que necessitam de um controle mais refinado da movimentação das partículas. Além disso, esses resultados e modelos propostos podem auxiliar na escolha do melhor agitador e também na melhor condição operacional para operar um leito de partículas com agitação mecânica. De modo geral, os resultados e discussões aqui apresentados podem incentivar novos estudos com leitos de partículas agitados, objetivando efetivamente fazer com que o uso de leitos de jorro chegue a uma escala industrial.



## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade ao estudo apresentado nesse trabalho, segue algumas sugestões:

- Propor um modelo para os parâmetros fluidodinâmicos, abrangendo as diferentes configurações dos agitadores e os grupos de partículas. Para melhorar o ajuste, pode-se restringir faixas específicas de operação.
- Analisar o processo de intermitência com o leito de jorro com agitador mecânico.
- Analisar a eficiência energética, podendo comparar diferentes formas de calcular o custo energético do processo.
- Analisar um modelo para simular o processo de secagem para as diferentes configurações dos agitadores mecânicos.
- Propor modelos para a distribuição granulométrica em função dos parâmetros do processo, como velocidade de rotação, vazão de ar e vazão de pasta.
- Analisar com mais detalhes a geometria do produto final da secagem em diferentes condições operacionais.
- Empregar essas técnicas no processo de recobrimento de partículas e em outras pastas mais complexas que não são possíveis no leito de jorro convencional, além de materiais fibrosos, como bagaço de cana e laranja por exemplo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADEODATO, M. G. **Análise da fluidodinâmica de leito de jorro durante o recobrimento de partículas**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, 2003.
- ALMEIDA, A. R. F. **Análise da secagem de pastas em leito de jorro**. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, São Carlos-SP, 2009.
- ALMEIDA, A. R. F.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Transient Analysis of Pasty Material Drying in a Spouted Bed of Inert Particles. **Drying Technology**, v. 28, n. 3, p. 330–340, 2010. DOI: 10.1080/07373931003627189.
- ALTZIBAR, H.; LOPEZ, G.; BILBAO, J.; OLAZAR, M. Effect of draft tube geometry on pressure drop in draft tube conical spouted beds. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 91, n. 11, p. 1865–1870, 2013. DOI: 10.1002/cjce.21913.
- AMBROSIO, M. C. B.; TARANTO, O. P. The drying of solids in a modified fluidized bed. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 19, n. 3, p. 355–358, 2002. DOI: 10.1590/S0104-66322002000300010.
- BAIT, R. G.; PAWAR, S. B.; BANERJEE, A. N.; MUJUMDAR, A. S.; THORAT, B. N. Mechanically Agitated Fluidized Bed Drying of Cohesive Particles at Low Air Velocity. **Drying Technology**, v. 29, n. 7, p. 808–818, 2011. DOI: 10.1080/07373937.2010.541574.
- BARCELOS, K. M.; ALMEIDA, P. S.; ARAUJO, M. S.; XAVIER, T. P.; SANTOS, K. G.; BACELOS, M. S.; LIRA, T. S. Particle segregation in spouted bed pyrolysis reactor: Sand-coconut shell and sand-cocoa shell mixtures. **Biomass and Bioenergy**, v. 138, p. 105592, 2020. DOI: 10.1016/j.biombioe.2020.105592.
- BARRET, N.; FANE, A. Drying pf Liquid Material in a Spouted Bed. In: MUJUMDAR,

- A. **Drying'89**. New York, USA, Hemisphere Publ. Co., 1989. v. B, p. 415-420
- BARROS, J. P. A. A.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C. Spouted bed drying on inert particles: Evaluation of particle size distribution of recovered, accumulated and elutriated powders of recovered, accumulated and elutriated powders. **Drying Technology**, v. 0, n. 0, p. 1–12, 2019. DOI: 10.1080/07373937.2019.1656644.
- BARROS, J. P. A. A. **Acúmulo, elutriação e recuperação do produto na secagem de pasta em leito de jorro**. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, São Carlos-SP, Universidade Federal de São Carlos, 2018.
- BARROS, J. P. A. de A.; BRITO, R. C.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T.. Fluid Dynamic Analysis of a Modified Mechanical Stirring Spouted Bed: Effect of Particle Properties and Stirring Rotation. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 59, n. 37, p. 16396–16406, 2020. DOI: 10.1021/acs.iecr.0c03139.
- BILBAO, J.; OLAZAR, M.; ROMERO, A.; ARANDES, J. M. Design and Operation of a Jet Spouted Bed Reactor with Continuous Catalyst Feed in the Benzyl Alcohol Polymerization. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 26, n. 7, p. 1297–1304, 1987. DOI: 10.1021/ie00067a007.
- BOWEN, P. Particle size distribution measurement from millimeters to nanometers and from rods to platelets. **Journal of Dispersion Science and Technology**, v. 23, n. 5, p. 631–662, 2002. DOI: 10.1081/DIS-120015368.
- BRITO, R. C.; PÁDUA, T. F.; FREIRE, J. T.; BÉTTEGA, R. Effect of mechanical energy on the energy efficiency of spouted beds applied on drying of sorghum [*Sorghum bicolor* (L) *moench*]. **Chemical Engineering & Processing: Process Intensification**, v. 117, n. March, p. 95–105, 2017. DOI: 10.1016/j.cep.2017.03.021.
- BRITO, R. C.; SOUSA, R. C.; BÉTTEGA, R.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Analysis

of the energy performance of a modified mechanically spouted bed applied in the drying of alumina and skimmed milk. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 130, p. 1–10, 2018. DOI: 10.1016/j.cep.2018.05.014.

BRITO, R. C.; ZACHARIAS, M. B.; FORTI, V. A.; FREIRE, J. T. Physical and physiological quality of intermittent soybean seeds drying in the spouted bed. **Drying Technology**, v. 0, n. 0, p. 1–14, 2020. DOI: 10.1080/07373937.2020.1725544.

CHRIST, D. **Secagem de clara de ovo em leito de jorro fluidizado bidimensional**. Tese (Doutorado) - Universidade de Campinas, Unicamp, Campinas –SP, 2006.

CORRÊA, N. A. **Controle da secagem de pasta em leito de jorro**. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, São Carlos-SP, 2000.

DACANAL, G. C.; MENEGALLI, F. C. Experimental study of fluidized bed agglomeration of acerola powder. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 25, n. 1, p. 51–58, 2008. DOI: 10.1590/S0104-66322008000100007.

DOTTO, G. L.; SOUZA, V. C.; PINTO, L. A. A. Drying of chitosan in a spouted bed: The influences of temperature and equipment geometry in powder quality. **LWT - Food Science and Technology**, v. 44, n. 8, p. 1786–1792, 2011. DOI: 10.1016/j.lwt.2011.03.019.

ESTIATI, I.; TELLABIDE, M.; SALDARRIAGA, J. F.; ALTZIBAR, H.; OLAZAR, M. Influence of the fountain confiner in a conical spouted bed dryer. **Powder Technology**, v. 356, p. 193–199, 2019. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.08.005.

FELFOUL, I.; BURGAIN, J.; PERROUD, C.; GAIANI, C.; SCHER, J.; ATTIA, H.; PETIT, J. Impact of *spray-drying* conditions on physicochemical properties and rehydration ability of skim dromedary and cow's milk powders. **Drying Technology**, v. 0, n. 0, p. 1–13, 2020. DOI: 10.1080/07373937.2020.1828448.

FERNANDES, C. F. **Análise da eficiência energética da secagem de pastas em leito de jorro**. Defesa de Mestrado - Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, Departamento de Engenharia Química, 2005.

FILKOVÁ, I.; MUJUMDAR, A. S. Industrial Spray Drying Systems. *In*: MUJUMDAR, A. S. (org.). **Handbook of Industrial Drying**. second edi ed., p. 263–308, 1995.

FREIRE, J. T.; ALBINI, G. **Tópicos especiais em sistemas particulados**. São Carlos : CS/UFSCar. v. 5, 2019.

FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, F. B.; NASCIMENTO, B. S. A Review on Paste Drying with Inert Particles as Support Medium. **Drying Technology**, v. 30, n. 4, p. 330–341, 2012. DOI: 10.1080/07373937.2011.638149.

GHOSH, B. A study on a spouted bed- A theoretical analysis. *In*: PRESS, Academic (org.). **Spouted Beds**. *In*: MATHUR, K. B. EPSTEIN, N., 1974.

JINAPONG, N.; SUPHANTHARIKA, M.; JAMNONG, P. Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. **Journal of Food Engineering**, v. 84, n. 2, p. 194–205, 2008. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.04.032.

KUDRA, T.; PALLAI, E.; BARTCZAKI, Z.; PETER, M. Drying of paste-like materials in screw-type spouted-bed and spin-flash dryers. **Drying Technology**, v. 7, n. 3, p. 583–597, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373938908916612>.

LIU, M.; CHEN, Z.; CHEN, M.; SHAO, Y.; LIU, B.; TANG, Y. Scale-up strategy study of coating furnace for TRISO particle fabrication based on numerical simulations. **Nuclear Engineering and Design**, v. 357, p. 110413, 2020. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2019.110413.

MAMURO, T.; HATTORI, H. Flow pattern of fluid in spouted beds. **Journal of Chemical Engineering of Japan**, v. 1, n. 1, p. 1–5, 1968. DOI: 10.1252/jcej.1.1.

MARKOWSKI, A.; KAMINSKI, W. Hydrodynamic characteristics of jet-spouted beds.

**The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 61, n. 3, p. 377–381, 1983. DOI: 10.1002/cjce.5450610318.

MARKOWSKI, A. S. Drying Characteristics in a Jet - Spout ed Bed Dryer. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 70, p. 938–944, 1992.

MARRETO, R. N.; PEIXOTO, M. P. G.; TEIXEIRA, C. C. C.; FREITAS, L. A. P. Analysis of pressure fluctuations during water evaporation in spouted bed. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 87, n. 3, p. 386–393, 2009. DOI: 10.1002/cjce.20173.

MEDEIROS, F. G. M.; MACHADO, I. P.; DANTAS, T. N. P.; DANTAS, S. C. M.; DE ALSINA, O. L. S.; DE MEDEIROS, M. F. D. Spouted Bed Drying of Fruit Pulps: A Case Study on Drying of Graviola (*Annona muricata*) Pulp. *In*: DELGADO J., Barbosa de Lima A. (org.). **Transport Processes and Separation Technologies. Advanced Structured Materials**. Springer, Cham, 2021. v. 133p. 105–150. DOI: 10.1007/978-3-030-47856-8\_5.

SOUSA, L. M.; FERREIRA, M. C. On the performance of a spouted bed type device for feeding spent coffee grounds to a circulating fluidized bed reactor. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 160, p. 31–38, 2020. DOI: 10.1016/j.cherd.2020.05.002.

MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted beds**. New York, 1974.

MATHUR, K. B.; GISHLER, P. E. A technique for contacting gases with coarse solid particles. **AIChE Journal**, v. 1, n. 2, p. 157–164, 1955. DOI: 10.1002/aic.690010205.

MEDEIROS, M. F. D.; ROCHA, S. C. S.; ALSINA, O. L. S.; JERÔNIMO, C. E. M.; MEDEIROS, U. K. L.; DA MATA, A. L. M. L. Drying of pulps of tropical fruits in spouted bed: Effect of composition on dryer performance. **Drying Technology**, v. 20, p. 855–881, 2002. DOI: 10.1081/DRT-120003767.

NASCIMENTO, B. S.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Moisture Prediction During Paste Drying in a Spouted Bed Moisture Prediction During Paste Drying in a Spouted Bed. **Drying Technology**, v. 31, p. 1808–1816, 2013. DOI: 10.1080/07373937.2013.825627.

NÉMETH, J.; PALLAI, E.; ARADI, E. Scale-up examination of spouted bed dryers. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 61, p. 419–425, 1983. DOI: 10.1002/cjce.5450610324.

NÉMETH, J.; PALLAI, E.; PÉTER, M.; TOROS, R. Heat transfer in a novel type spouted bed. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 61, p. 406 – 410, 1983. DOI: 10.1002/cjce.5450610322.

OCHOA MARTINEZ, L. A.; BRENNAN, J. G.; NIRANJAN, K. Drying of liquids in a spouted bed of inert particles: Heat transfer studies. **Journal of Food Engineering**, v. 20, p. 135–148, 1993. DOI: 10.1016/0260-8774(93)90011-8.

OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J.; AGUADO, R.; GAISÁN, B.; BILBAO, J. Bed voidage in conical sawdust beds in the transition regime between spouting and jet spouting. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 38, n. 10, p. 4120–4122, 1999. DOI: 10.1021/ie990228z.

OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J.; ALVAREZ, S.; MORALES, A.; BILBAO, J.. Design of Conical Spouted Beds for the Handling of Low-Density. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 43, p. 655–661, 2004.

OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J.; AGUAYO, A. T.; ARANDES, J. M.; BILBAO, Javier. Stable Operation Conditions for Gas-Solid Contact Regimes in Conical Spouted Beds. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 31, p. 1784–1792, 1992.

PABLOS, A.; AGUADO, R.; VICENTE, J.; ALTZIBAR, H.; BILBAO, J.; OLAZAR, M. Effect of operating conditions on the drying of fine and ultrafine sand in a fountain confined conical spouted bed. **Drying Technology**, v. 0, n. 0, p. 1–16, 2019. DOI:

10.1080/07373937.2019.1645684.

PALLAI, E.; SZENTMARJAY, T.; SZIJJÁRTÓ, E. Effect of partial processes of drying on inert particles on product quality. **Drying Technology**, v. 19, n. 8, p. 2019–2032, 2001. DOI: 10.1081/DRT-100107286.

PERAZZINI, M. B. T.; FREIRE, F. B.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. Stability and performance of a spouted bed in drying skimmed milk : Influence of the cone angle and air inlet device. **Drying Technology**, v. 36, n. 3, p. 341–354, 2017. DOI: 10.1080/07373937.2017.1331240.

PERAZZINI, M. T. B. **Análise Do Efeito Das Condições Operacionais E Características Geométricas Do Leito De Jorro Na Secagem De Pastas**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, 2015.

PHAM, Q. T. Behaviour of a conical spouted-bed dryer for animal blood. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 61, n. 3, p. 426–434, 1983. DOI: 10.1002/cjce.5450610325.

REYES, A.; DÍAZ, G.; MARQUARDT, F. H. Analysis of Mechanically Agitated Fluid-Particle Contact Dryers. **Drying Technology**, v. 19, n. 9, p. 2235–2259, 2001.

REYES, A.; VIDAL, I. Experimental analysis of a mechanically stirred spouted bed dryer. **Drying Technology**, v. 18, n.1-2, p. 341-359, 2000. DOI: 10.1080/07373930008917708.

REYES, A.; HERRERA, N.; VEGA, R.. Drying suspensions in a pulsed fluidized bed of inert particles. **Drying Technology**, v. 26, n. 1, p. 122–131, 2008. DOI: 10.1080/07373930701781777.

SAN JOSÉ, M. J.; OLAZAR, M.; AGUAYO, A. T.; ARANDES, J. M.; BILBAO, J. Expansion of spouted beds in conical contactors. **The Chemical Engineering Journal**, v. 51, n. 1, p. 45–52, 1993. DOI: 10.1016/0300-9467(93)80007-B.



SANTANA, E. B. **Análise experimental do comportamento fluidodinâmico e da secagem de sementes de linhaça (*Linum usitatissimum* L.) em leito de jorro.** Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2011.

SILVA, C. A. M. **Análise da dinâmica de secagem de pastas em leito de jorro.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, 2016.

SOUSA, R. C. **Secagem De Materiais Pastosos E Granulares No Leito De Jorro Mecânico E Convencional.** Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - SP, 2017.

SOUSA, R. C.; FERREIRA, M. C.; ALTZIBAR, H.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Drying of pasty and granular materials in mechanically and conventional spouted beds. **Particuology**, v. 42, p. 176–183, 2019. DOI: 10.1016/j.partic.2018.01.006.

SOUZA, A. S. **Avaliação por cfd da fluidodinâmica e da transferência de calor em leitos de jorro para diferentes ângulos da base cônica.** Dissertação (Mestrado) - Programa de PósGraduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, UFSCars, São Carlos, 2019.

SOUZA, C. R. F.; OLIVEIRA, W. P. Spouted bed drying of Bauhinia forficata link extract: The effects of feed atomized position and operating conditions on equipment performance and product properties. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 22, n. 02, p. 239–247, 2005.

SPITZER NETO, P. I.; CUNHA, F. O.; FREIRE, J. T. Effect of the presence of paste in a conical spotted bed dryer with continuous feeding. **Drying Technology**, v. 20, p. 789–811, 2002. DOI: 10.1081/DRT-120003758.

STRUMILLO, C.; MARKOWSKI, A.; KAMINSKI, W. Modern developments in drying of pasty materials. *In*: **MUJUNDAR, A. S. Advances in Drying, McGraw Hill, Washington.** p. 193–231, 1983.

SZENTMARIAY, T.; PALLAI, E.; SZALAY, A. Drying process on inert particles in mechanically spouted bed dryer. **Drying Technology**, v. 13, n. 5–7, p. 1203–1219, 1995. DOI: 10.1080/07373939508917017.

SZENTMARJAY, T.; PALLAI, E. Drying of suspensions in a modified spouted bed drier with an inert packing. **Drying Technology**, v. 7, n. 3, p. 523–536, 1989. DOI: 10.1080/07373938908916607.

SZENTMARJAY, T.; PALLAI, E.; REGÉNYI, Zs. Short-Time Drying of Beetsensitive, Biologically Active Pulps and Pastes. **Drying Technology**, v. 14, n. 9, p. 2091–2115, 1996. DOI: 10.1080/07373939608917197.

SZENTMARJAY, T.; SZALAY, A.; PALLAI, I. Hydrodynamical measurements in mechanically spouted bed. **Hungarian Journal of industrial chemistry veszprém**, v. 20, p. 219–224, 1992.

SZENTMARJAY, T.; PALLAI, E.; TÓTH, J.. Mechanical spouting. *In: Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications*. p. 297–304, 2011.

SCHNEIDER, T.; BRIDGWATER, J. Drying "89". *In: (Mc Ed. by A. S. MUJUNDAR, Gill University, Org.) 1989, Canada: Hemisphere. Anais*. Canada: Hemisphere p. 421–425.

TELLABIDE, M.; ESTIATI, I.; PABLOS, A.; ALTZIBAR, H.; AGUADO, R.; OLAZAR, M. New operation regimes in fountain confined conical spouted beds. **Chemical Engineering Science**, v. 211, p. 115255, 2020. DOI: 10.1016/j.ces.2019.115255.

VIEIRA, G. N. A. **Monitoramento em tempo real e simulação de controle da umidade de pós produzidos pela secagem de pastas em leito de jorro**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química, 2015.

WANG, Z.; BI, H. T.; LIM, C. J.; SU, P. Determination of Minimum Spouting Velocities

in Conical Spouted Beds. **The canadian journal of chemical engineering**, v. 82, p. 11–19, 2004.