

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

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DO LEITO VIBROFLUIDIZADO NA SECAGEM DE  
PASTA**

Ariany Binda Silva Costa

**Orientador:** José Teixeira Freire

**Co-orientador:** Fábio Bentes Freire

São Carlos-SP

2017

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

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DO LEITO VIBROFLUIDIZADO NA SECAGEM DE  
PASTA**

Trabalho de doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área concentrada em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Ariany Binda Silva Costa

**Orientador:** José Teixeira Freire

**Co-orientador:** Fábio Bentes Freire

São Carlos-SP

2017

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE TESE DE ARIANY BINDA SILVA COSTA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 05 DE MAIO DE 2017.

BANCA EXAMINADORA:

  
José Teixeira Freire  
Orientador, UFSCar

  
Fábio Bentes Freire  
UFSCar

  
Thiago Faggion de Pádua  
UFSCar

  
Bruna de Souza Nascimento  
UFLA

  
Lucas Meili  
UFAL

*Dedico este trabalho aos meus pais,  
Wantuil Costa e Tânia Mara Silva Costa.*

## AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido força e perseverança para superar os obstáculos encontrados durante o caminho, tornando possível alcançar mais esta conquista em minha vida.

Aos meus pais e maiores incentivadores, Wantuil e Tânia, pelo amor incondicional, confiança, apoio e por tudo que fizeram por mim. Esta conquista também é de vocês.

A minha irmã, Alana, pelo amor, incentivo, carinho e por acreditar sempre em mim.

Aos meus avós e familiares pela torcida e por compreenderem a minha ausência.

Ao meu amor, Robson, pelo incentivo, paciência, companheirismo, amor e dedicação. O seu apoio foi fundamental ao longo desta etapa.

Ao meu orientador, professor José Teixeira Freire, pela oportunidade que me foi concedida, pelo carinho, amizade, paciência, estímulo e orientação. Serei eternamente grata a tudo que me foi proporcionado durante esses anos do doutorado.

Ao meu co-orientador, professor Fábio Bentes Freire, pela amizade, estímulo e pelas colaborações na realização deste trabalho.

Ao professor Tiago Faggion Pádua pela amizade e pelas contribuições dadas durante o desenvolvimento da tese, principalmente na construção do sistema de aquisição de dados em linguagem LabVIEW, o qual foi muito importante para a continuação dos ensaios experimentais.

A professora Maria do Carmo Ferreira, pela orientação no mestrado, carinho, amizade e pelas sugestões dadas para a construção deste trabalho.

Aos demais professores da área de Sistema Particulados, Demerval José Mazzini Sartori, Ronaldo Guimarães Corrêa, Rodrigo Béttega e Gustavo Maia pelas contribuições durante os seminários e o workshop desenvolvido no Centro de Secagem.

Aos meus amigos Maisa e Hugo. Nunca irei esquecer o carinho com que me receberam nas minhas primeiras semanas em São Carlos.

As minhas amigas e companheiras de apê, Isabela, Camila, Priscila, Lívia e Débora pela amizade, carinho e momentos de descontração.

Aos meus amigos e colegas do Centro de Secagem pelos momentos agradáveis e boas gargalhadas.

Aos Técnicos, Edilson Milaré, Oscar da Silva, Samuel Ferro e Adilson Mota pelo apoio prestado.

Aos amigos que fiz em São Carlos pelo companheirismo e amizade.

Aos meus amigos do Espírito Santo pelo carinho e torcida. Pois independente da distância sempre se fizeram presentes.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,  
mas lutei para que o melhor fosse feito.  
Não sei o que deveria ser, mas graças a Deus,  
não sou o que era antes.”*  
*(Marthin Luther King)*

## RESUMO

A agitação promovida pelo leito vibrofluidizado possibilita incorporar várias operações unitárias como granulação, revestimento de partículas, secagem de grãos e a secagem de materiais pastosos. No entanto, muito ainda precisa ser estudado sobre a secagem de pasta neste equipamento, pois conforme os trabalhos de Daleffe (2005) e Meili (2009) verificou-se que um mesmo número adimensional de vibração ( $\Gamma$ ) apresentou comportamentos fluidodinâmicos diferentes e influenciou de maneiras distintas no processo. Para compreender melhor a interferência dos parâmetros vibracionais neste tipo de operação, o objetivo do presente trabalho consistiu em desenvolver um estudo detalhado sobre a secagem do leite desnatado em leito vibrofluidizado, variando as intensidades de agitação impostas ao leito, duas amplitudes ( $A$ ), 0,003m e 0,015m, combinadas as frequências ( $f$ ) que variaram entre 100 e 1100RPM. Desta forma, primeiramente, analisou-se a influência que os parâmetros vibracionais exerceram nas curvas características da queda de pressão e desvio padrão de queda de pressão em função da velocidade superficial do fluido ( $U_s$ ), quando o leito foi constituído com esferas de vidro dos seguintes diâmetros, 0,00119m, 0,00219m e 0,00319m. Em seguida, foram realizados testes de evaporação de água para determinar o tamanho do material inerte e as condições experimentais que seriam usadas nos ensaios de secagem de pasta. Para a secagem do leite desnatado foram usadas as esferas de vidro com 0,00319m de diâmetro médio, temperatura do ar de 100°C, velocidade superficial do ar 20% superior a velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ), diferentes intensidades de agitação e diferentes vazões de pastas. Durante estes experimentos analisou-se a influência da agitação nos adimensionais de queda de pressão, temperaturas do ar na saída do leito, umidades relativas do ar na saída do leito, umidades do pó, taxas de produção e taxas de acúmulo do pó. Diante dos resultados obtidos, pode-se verificar nas duas amplitudes que o aumento da intensidade de agitação, através do aumento da frequência, possibilitou o uso de maiores vazões máximas de leite desnatado no equipamento. Também foi observado, para os valores de  $\Gamma$  quase constantes com diferentes combinações de  $A$  e  $f$ , que a agitação com amplitude de 0,015m resultou nas maiores variações de queda de pressão durante o processo, nos menores patamares de umidade relativa, nas maiores taxa de produção do pó e maiores taxas de acúmulo de pó na saída do ciclone. Salientando assim a importância em informar  $A$  e  $f$  para caracterizar a vibração implementada no leito vibrofluidizado. A partir destes dados experimentais também construiu-se um modelo híbrido CST/ Rede Neural para descrever os fenômenos de transferência de calor e massa que ocorreram durante a secagem do leite desnatado. Os resultados mostraram que o modelo proposto apresentou boa concordância com os dados experimentais, podendo levar em consideração que o leito vibrofluidizado comportou-se como um tanque perfeitamente agitado.



## ABSTRACT

The agitation promoted by the vibrofluidized bed allows the incorporation of several unitary operations such as granulation, coating of particle, drying of grains, and the drying of pasty materials. However, it is necessary more studies about the drying of paste in this equipment, since according to the work of Daleffe (2005) and Meili (2009) it was verified that a same dimensionless vibration number ( $\Gamma$ ) presented different dynamics behaviors and influenced in distinct ways in the process. To understand more about the interference that the vibrational parameters may exert in this type of operation, that the goal of this present work was to develop a more detailed study on the drying of skimmed milk in vibrofluidized bed, varying the intensities of agitation imposed to the bed, two Amplitude ( $A$ ) from 0.003m and 0.015m combined at frequencies ( $f$ ) ranging from 100 to 1100 RPM. Thus, firstly, it was analyzed the influence that the vibrational parameters exercised on the characteristic curves of the pressure drop and the standard deviation of pressure drop in function of the superficial velocity of the fluid ( $U_s$ ), when the bed was constituted with glass beads with the diameters of 0.00119m, 0.00219m, and 0.00319m. Thereafter, water evaporation tests were performed to determine the size of the inert material and the experimental conditions that would be used in the paste drying trials. For the drying of the skimmed milk has been used glass beads with 0.00319m of average diameter, air temperature of 100 ° C, surface velocity of 20% higher than minimum fluidization velocity ( $U_{mf}$ ), different agitation intensities and different paste feed rates. During the experiments, the influence of agitation on the dimensionless pressure drop, air temperature at the bed outlet, relative air humidity at the bed outlet, powder moisture content, powder production rates and powder accumulation rates were analyzed. Analyzing the obtained results, it may be verified in the two amplitudes that the increase of the agitation intensity, through the increase of the frequency, allowed the use of higher maximum feeds rates of skimmed milk in the equipment. It was also observed, for the values of  $\Gamma$  almost constant with different combinations of  $A$  and  $f$ , that the agitation with amplitude of 0.015m resulted in the greatest variations of pressure drop during the process, in the lower relative humidity levels, in the higher powder production rate and higher powder accumulation rates at the exit of the cyclone. In this way emphasizing the importance to inform  $A$  and  $f$  to characterize the implemented vibration in the vibrofluidized bed. From these experimental data was designed a hybrid CST / Neural to describe the heat and mass transfer phenomena that occurred during the drying of skim milk. The results showed that the proposed model presented a great agreement with the experimental data, assuming that the vibrofluidized bed behaved as a perfectly stirred tank.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama de Geldart para a classificação das partículas. ....	14
Figura 2.2: Tipos de curvas características de um leito fluidizado convencional (a) e do leito vibrofluidizado (b, c, d). ....	16
Figura 2.3: Esquema do processo de secagem de pasta em leito vibrofluidizado com partículas inertes. ....	24
Figura 3.1: Unidade experimental. ....	41
Figura 3.2: Diagrama do fluxo de dados do processo. ....	51
Figura 4.1: Queda de pressão e desvio padrão de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibrofluidizado com esferas de vidro de 0,00319m e agitação com (a) A=0,003m e 400RPM e (b) A=0,015m e 300RPM, parametrizados por suas repetições. ....	53
Figura 4.2: Curvas características de um leito fluidizado convencional, $\Gamma=0$ , parametrizadas no diâmetro das esferas de vidro. ....	55
Figura 4.3: Curvas de queda de pressão e desvio padrão de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar, para o leito com esferas de vidro de 0,00119m de diâmetro, amplitude de 0,003m (a) e 0,015m (b), e esferas de vidro de 0,00319m de diâmetro, amplitude de 0,003m (c) e 0,015m (d), ambos os gráficos parametrizados pelas diferentes frequências.. ....	57
Figura 4.4: Umidade relativa e absoluta do ar durante a evaporação de água para agitação do leito com $\Gamma=0,65$ (0,015m e f=200RPM) e T=100°C, parametrizado no diâmetro das esferas de vidro. ....	63
Figura 4.5: Fotos de diferentes instantes do processo de secagem de leite desnatado a T=100°C, vazão do ar de 1,25m <sup>3</sup> /min, vazão de pasta de 18mL/min e esferas de vidro de 0,00119m diâmetro. ....	64
Figura 4.6: Temperatura do ar de saída (a) do leito e umidade relativa do ar (b) do processo de evaporação de água para agitação do leito com $\Gamma=0,65$ (0,015m e f=200RPM), vazão de ar de 1,25m <sup>3</sup> /min e T=80°C, ambos os gráficos parametrizados na vazão de alimentação de água. ....	66
Figura 4.7: Temperatura do ar de saída (a) do leito e umidade relativa do ar (b) do processo de evaporação de água para agitação do leito com $\Gamma=0,65$ (0,015m e f=200RPM), vazão de ar de 1,25m <sup>3</sup> /min e T=100°C, ambos os gráficos parametrizados na vazão de alimentação de água. ....	67
Figura 4.8: Temperatura do ar de saída (a) do leito e umidade relativa do ar (b) do processo de evaporação de água para agitação do leito com $\Gamma=0,65$ (0,015m e f=200RPM), vazão de ar de 1,07m <sup>3</sup> /min e T=100°C, ambos os gráficos parametrizados na vazão de alimentação de água. ....	69
Figura 4.9: Temperatura do ar de saída (a) do leito e umidade relativa do ar (b) do processo de evaporação de água para agitação do leito com $\Gamma=0,65$ (0,015m e f=200RPM), vazão de ar de 1,25m <sup>3</sup> /min e T=100°C, ambos os gráficos parametrizados na vazão de alimentação de água. ....	69

- Figura 4.10: Adimensionais de queda de pressão do leito vibrofluidizado em função do tempo, na condição de  $T=100^{\circ}\text{C}$ ,  $U_s=1,2U_{mf}$  e  $\Gamma=6,04$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=600\text{RPM}$ ), parametrizado nas repetições para vazão de  $18\text{mL}/\text{min}$ . ..... 73
- Figura 4.11: Adimensionais de queda de pressão do leito vibrofluidizado em função do tempo, na condição de  $T=100^{\circ}\text{C}$ ,  $U_s=1,2U_{mf}$  e  $\Gamma=0,53$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=400\text{RPM}$ ) (a) e com  $\Gamma=4,06$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=1100\text{RPM}$ ) (b), ambos os gráficos parametrizados na vazão de leite desnatado. .... 74
- Figura 4.12: Adimensionais de queda de pressão do leito vibrofluidizado em função do tempo, na condição de  $T=100^{\circ}\text{C}$ ,  $U_s=1,2U_{mf}$  e  $\Gamma=0,148$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=100\text{RPM}$ ) (a) e com  $\Gamma=6,04$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=600\text{RPM}$ ) (b), ambos os gráficos parametrizados na vazão de leite desnatado. .... 74
- Figura 4.13: Foto do canal preferencial desenvolvido durante o processo de secagem de pasta com vazão de  $26\text{mL}/\text{min}$ , quando o leito vibrofluidizado foi submetido a agitação com  $A=0,015\text{m}$  e  $f=600\text{RPM}$ . ..... 77
- Figura 4.14: Adimensionais de queda de pressão do leito vibrofluidizado em função do tempo, na condição de  $T=100^{\circ}\text{C}$ ,  $U_s=1,2U_{mf}$  e  $\Gamma=0,53$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=400\text{RPM}$ ) (a) e com  $\Gamma=0,65$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=200\text{RPM}$ ) (b), ambos os gráficos parametrizados na vazão de leite desnatado. .... 78
- Figura 4.15: Adimensionais de queda de pressão do leito vibrofluidizado em função do tempo, na condição de  $T=100^{\circ}\text{C}$ ,  $U_s=1,2U_{mf}$  e  $\Gamma=1,65$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=700\text{RPM}$ ) (a) e com  $\Gamma=1,48$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=300\text{RPM}$ ) (b), ambos os gráficos parametrizados na vazão de leite desnatado. .... 79
- Figura 4.16: Adimensionais de queda de pressão do leito vibrofluidizado em função do tempo, na condição de  $T=100^{\circ}\text{C}$ ,  $U_s=1,2U_{mf}$  e  $\Gamma=2,7$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=900\text{RPM}$ ) (a) e com  $\Gamma=2,69$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=400\text{RPM}$ ) (b), ambos os gráficos parametrizados na vazão de leite desnatado. .... 80
- Figura 4.17: Adimensionais de queda de pressão do leito vibrofluidizado em função do tempo, na condição de  $T=100^{\circ}\text{C}$ ,  $U_s=1,2U_{mf}$  e  $\Gamma=4,2$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=500\text{RPM}$ ) (a) e com  $\Gamma=4,06$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=1100\text{RPM}$ ) (b), ambos os gráficos parametrizados na vazão de leite desnatado. .... 80
- Figura 4.18: Umidade relativa do ar de saída do leito vibrofluidizado quando submetido a agitação com  $\Gamma=0,53$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=400\text{RPM}$ ) (a) e  $\Gamma=4,06$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=1100\text{RPM}$ ) (b) para a condição de  $T=100^{\circ}\text{C}$  e  $U_s=1,20U_{mf}$ , ambos os gráficos parametrizados na vazão de leite desnatado. .... 83
- Figura 4.19: Umidade relativa do ar de saída do leito vibrofluidizado quando submetido a agitação com  $\Gamma=0,148$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=100\text{RPM}$ ) (a) e  $\Gamma=6,04$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=600\text{RPM}$ ) (b), para a condição de  $T=100^{\circ}\text{C}$  e  $U_s=1,20U_{mf}$ , ambos os gráficos parametrizados para a vazão de leite desnatado. .... 83
- Figura 4.20: Umidade relativa do ar de saída do leito vibrofluidizado quando submetido a agitação com  $\Gamma=0,53$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=400\text{RPM}$ ) e  $\Gamma=0,65$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=200\text{RPM}$ ) para a vazão de  $14\text{mL}/\text{min}$ ,  $T=100^{\circ}\text{C}$  e  $U_s=1,20U_{mf}$ . .... 86
- Figura 4.21: Umidade relativa do ar de saída do leito vibrofluidizado quando submetido a agitação com  $\Gamma=1,65$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=700\text{RPM}$ ) e  $\Gamma=1,48$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=300\text{RPM}$ ) para a vazão de  $14\text{mL}/\text{min}$  e  $18\text{mL}/\text{min}$ ,  $T=100^{\circ}\text{C}$  e  $U_s=1,20U_{mf}$ . .... 86

- Figura 4.22: Umidade relativa do ar de saída do leito vibrofluidizado quando submetido a agitação com  $\Gamma=2,7$  ( $A=0,003m$  e  $f=900RPM$ ) e  $\Gamma=2,69$  ( $A=0,015m$  e  $f=400RPM$ ) para as vazões de  $14mL/min$  e  $18mL/min$ ,  $T= 100^{\circ}C$  e  $U_s=1,20U_{mf}$ . ..... 87
- Figura 4.23: Umidade relativa do ar de saída do leito vibrofluidizado quando submetido a agitação com  $\Gamma=4,06$  ( $A=0,003$  e  $f=1100RPM$ ) e  $\Gamma=4,2$  ( $A=0,015m$  e  $f=500RPM$ ) para as vazões de  $18mL/min$  e  $26mL/min$ ;  $T= 100^{\circ}C$  e  $U_s=1,20U_{mf}$ . ..... 88
- Figura 4.24: Temperatura do ar na saída do leito vibrofluidizado quando o processo de secagem foi realizado a  $T=100^{\circ}C$ ,  $U_s=1,2U_{mf}$  e agitação de  $\Gamma=0,53$  ( $A=0,003m$  e  $f=400RPM$ ) (a) e  $\Gamma=4,06$  ( $A=0,003m$  e  $f=1100RPM$ ) (b), ambos os gráficos parametrizados na vazão de leite desnatado. .... 90
- Figura 4.25: Temperatura do ar na saída do leito vibrofluidizado quando o processo de secagem foi realizado a  $T=100^{\circ}C$ ,  $U_s=1,2U_{mf}$  e agitação de  $\Gamma=0,148$  ( $A=0,015m$  e  $f=100RPM$ ) (a) e  $\Gamma=6,04$  ( $A=0,015m$  e  $f=600RPM$ ) (b), ambos os gráficos parametrizados na vazão de leite desnatado. .... 90
- Figura 4.26: Temperatura do ar na saída do leito vibrofluidizado quando submetido a agitação com  $\Gamma=0,53$  ( $A=0,003m$  e  $f=400RPM$ ) e  $\Gamma=0,65$  ( $A=0,015m$  e  $f=200RPM$ ) para a vazão de  $14mL/min$ ,  $T= 100^{\circ}C$  e  $U_s=1,20U_{mf}$ . .... 92
- Figura 4.27: Temperatura do ar na saída do leito vibrofluidizado quando submetido a agitação com  $\Gamma=1,65$  ( $A=0,003m$  e  $f=700RPM$ ) e  $\Gamma=1,48$  ( $A=0,015m$  e  $f=300RPM$ ) para as vazões de  $14mL/min$  e  $18mL/min$ ,  $T= 100^{\circ}C$  e  $U_s=1,20U_{mf}$ . .... 93
- Figura 4.28: Temperatura do ar na saída do leito vibrofluidizado quando submetido a agitação com  $\Gamma=2,7$  ( $A=0,003m$  e  $f=900RPM$ ) e  $\Gamma=2,69$  ( $A=0,015m$  e  $f=400RPM$ ) para as vazões de  $14mL/min$  e  $18mL/min$ ,  $T= 100^{\circ}C$  e  $U_s=1,20U_{mf}$ . .... 93
- Figura 4.29: Temperatura do ar na saída do leito vibrofluidizado quando submetido a agitação com  $\Gamma=4,06$  ( $A=0,003m$  e  $f=1100RPM$ ) e  $\Gamma=4,2$  ( $A=0,015m$  e  $f=500RPM$ ) para as vazões de  $18mL/min$  e  $26mL/min$ ;  $T= 100^{\circ}C$  e  $U_s=1,20U_{mf}$ . .... 94
- Figura 4.30: Fotos das esferas de vidro recolhidas ao final do processo de secagem, referentes aos ensaios realizados a vazão de  $14mL/min$  (a) e  $26mL/min$  (b). .... 99
- Figura 4.31: Valores de  $k$  experimentais versus os valores de  $k$  obtidos pela rede neural construída e treinada. .... 103
- Figura 4.32: Valores do termos de acoplamento entre as fases experimentais e obtidos pela rede neural que representam a condição de  $14mL/min$ ,  $A=0,015m$  e  $f=400RPM$ . .... 103
- Figura 4.33: Valores dos termos de acoplamento entre as fases experimentais e obtidos pela rede neural que representam a condição de  $18mL/min$ ,  $A=0,003m$  e  $f=900RPM$ . .... 104
- Figura 4.34: Dados experimentais e simulados da umidade relativa do ar na saída do leito vibrofluidizado para os experimentos realizados a temperatura de  $100^{\circ}C$ , velocidade do ar de entrada 20% acima da velocidade de mínima fluidização e vazão de pasta de  $14mL/min$ . ... 105
- Figura 4.35: Dados experimentais e simulados da temperatura do ar na saída do leito vibrofluidizado para os experimentos realizados a temperatura de  $100^{\circ}C$ , velocidade do ar de entrada 20% acima da velocidade de mínima fluidização e vazão de pasta de  $14mL/min$ . ... 105
- Figura 4.36: Dados experimentais e simulados da umidade do pó coletado na saída do ciclone para os experimentos realizados a temperatura de  $100^{\circ}C$ , velocidade do ar de entrada 20% acima da velocidade de mínima fluidização e vazão de pasta de  $14mL/min$ . .... 106

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Estudos sobre a fluidodinâmica do leito vibrofluidizado.....	18
Quadro 2.2: Continuação do Quadro 2.1 .....	19
Quadro 2.3: Estudos que usaram a rede neural como ferramenta para auxiliar na descrição de processos.....	36
Quadro 2.4: Continuação do Quadro 2.3 .....	37

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Composição geral do leite desnatado .....	42
Tabela 2: Condições experimentais fluidodinâmicas.....	44
Tabela 3: Condições experimentais de secagem .....	47
Tabela 4: Velocidades de mínima fluidização encontradas com o auxílio das retas tangentes, segundo a metodologia de Bratu e Jinescu (1971), para os leitos das esferas de vidro com 0,0019m e 0,00319m de diâmetro médio, quando submetidas a diferentes intensidades de agitação. ....	61
Tabela 5: Vazão máxima de alimentação do leite desnatado obtida no leito vibrofluidizado. ....	95
Tabela 6: Taxa de produção e Taxa de acúmulo de pó. ....	97
Tabela 7: Umidade do pó do leite desnatado recolhido na saída do ciclone em função do tempo de processo. ....	100

## NOMECLATURA

A	Amplitude	[L]
a	Coefficiente de ajuste	[MT <sup>-1</sup> ]
b	Coefficiente de ajuste	[T <sup>-1</sup> ]
c <sub>p</sub>	Calor específico	[L <sup>-2</sup> T <sup>-3</sup> Θ <sup>-1</sup> ]
d <sub>p</sub>	Diâmetro médio de Sauter	[L]
D <sub>m</sub>	Diâmetro médio da partícula	[L]
f	Frequência vibracional	[T <sup>-1</sup> ]
F	Vazão mássica	[MT <sup>-1</sup> ]
g	Aceleração gravitacional	[LT <sup>-2</sup> ]
H	Altura do leito particulado	[L]
k	Termo de acoplamento entre as fases	[MT <sup>-1</sup> ]
ṁ	Vazão mássica de ar	[MT <sup>-1</sup> ]
m	Massa	[M]
p	Pressão	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
q	Calor perdido pelo vibrofluidizado	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-3</sup> ]
Q	Quantidade de calor transferido	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-3</sup> ]
U	Velocidade do ar	[LT <sup>-1</sup> ]
U <sub>s</sub>	Velocidade superficial do ar	[LT <sup>-1</sup> ]
UA	Umidade Absoluta	[-]
UR	Umidade Relativa	[-]
t	Tempo	[T]
T	Temperatura	[Θ]
W	Vazão mássica	[MT <sup>-1</sup> ]
x	Fração de água líquida	[-]
X	Fração mássica das partículas	[-]
y	Fração do vapor de água	[-]

### Letras Gregas

Δ	Diferença	[-]
Γ	Número adimensional de vibração	[-]
ω	Frequência angular	[LT <sup>-1</sup> ]
ρ	Massa específica	[MT <sup>-3</sup> ]
λ	Calor latente de vaporização	[MLT <sup>-3</sup> ]

### Subscrito

0	Saída	[-]
i	Entrada	[-]
ent	Entrada	[-]
sai	Saída	[-]
g	gás	[-]
mf	Mínima fluidização	[-]
mm	Mínima mistura	[-]

p	Pasta	[-]
s	Partícula inerte	[-]
v	vibrofluidizado	[-]

**Abreviaturas**

LFC	Leito fluidizado convencional	[-]
LVF	Leito vibrofluidizado	[-]
CST	Tanque perfeitamente agitado	[-]
RNA	Rede Neural Artificial	[-]



## SUMÁRIO

AGRADECIMENTO .....	ii
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE QUADROS .....	x
LISTA DE TABELAS .....	xi
NOMECLATURA .....	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 Aspectos gerais do leito vibrofluidizado .....	5
2.1.1 Energia vibracional .....	7
2.1.2 Regime operacional.....	11
2.1.3 Classificação das partículas.....	13
2.1.4 Propriedade Fluidodinâmica .....	15
2.2 Secagem de pasta em leito vibrofluidizado .....	23
2.3 Forças Interparticulares.....	29
2.4 Modelagem do processo de secagem de pasta em leito vibrofluidizado. ....	33
2.5 Considerações Finais .....	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1 Unidade Experimental. ....	40
3.2 Material particulado e Pastas .....	42
3.3 Procedimento Experimental.....	43
3.3.1 Obtenção da curva fluidodinâmica.....	43

3.3.2 Testes de Evaporação de água e secagem de leite desnatado .....	45
3.3.3 Secagem de pasta .....	47
3.4 Modelo Matemático .....	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	52
4.1. Ensaio fluidodinâmico .....	52
4.2 Testes de evaporação de água e secagem de leite em função do diâmetro da partícula .....	62
4.3 Secagem de pasta .....	71
4.3.1 Análise fluidodinâmica .....	72
4.3.2 Análise da Umidade Relativa .....	82
4.3.3 Análise da temperatura do ar na saída do leito .....	89
4.3.4 Vazão de alimentação de pasta .....	94
4.3.5 Taxa de produção e acúmulo de pó .....	96
4.3.6 Conteúdo de água no pó .....	99
4.3.7 Análise do modelo CST/Rede Neural .....	101
5 CONCLUSÕES .....	107
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	112

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Os materiais pastosos são matérias-primas encontradas em diferentes tipos de indústrias, como por exemplo, no setor químico, farmacêutico e alimentício. Porém dificilmente este tipo de material é manuseado na sua forma *in natura*, por isso o processo de secagem acaba sendo uma operação muito comum em alguns destes setores, pois têm a finalidade de facilitar o manuseio, aumentar a vida útil, facilitar o transporte e armazenamento, e também favorecer a padronização do produto ao final do processo.

Como são materiais que apresentam em sua constituição uma grande quantidade de água, uma das técnicas de secagem que tem se mostrado promissora e efetiva, além do spray dryer, é a de leitos “móveis” com o auxílio de partículas inertes. De acordo com esta técnica, um fluido aquecido irá escoar no interior do material particulado e será responsável por promover a suspensão do mesmo. Assim que a pasta for inserida no leito, adere muito rapidamente à superfície deste inerte, iniciando a formação de uma fina camada do material pastoso. Conforme o processo de secagem transcorre, a película do filme líquido que envolve o material inerte seca, decorrente da transferência de calor e massa, desencadeando assim as mudanças na sua reológica. Como o material particulado encontra-se em movimento no interior do leito, são geradas então colisões entre os mesmos, responsáveis pela quebra e desprendimento do filme seco. Com isso, a pasta que neste momento já se tornou pó, será transportada pela corrente de fluido e ao final do sistema será coletado por um ciclone, por exemplo (FREIRE et al., 2012).

Aparentemente a descrição da secagem de pasta com auxílio de partículas inertes demonstra ser um processo simples, mas segundo Freire (1992), os fenômenos envolvidos no sistema o tornam bastante complexo. Pois ao mesmo tempo em que ocorre a transferência de calor, por condução e por convecção, e a transferência de massa durante a secagem, ainda vão existir forças que circundam o sistema fluido-partícula, que poderão influenciar nestes

fenômenos. Outro fator que também pode interferir significativamente no processo são as características coesivas das pastas e as condições operacionais utilizadas.

Entre os secadores que foram desenvolvidos baseados na técnica de leitos “móveis” com material inerte, pode-se citar o leito de jorro, o leito fluidizado, o leito fluidizado pulsante e o leito vibrofluidizado. O leito vibrofluidizado tem apresentado vantagens, devido a agitação imposta mecanicamente ao sistema fluido-partícula, responsável pelos altos coeficientes de transferência de calor e massa, baixos valores de queda de pressão referentes à mínima fluidização, além também, de possibilitar a fluidização de materiais pastosos, polidispersos e coesivos, quando comparados com os leitos fluidizados convencionais (BRATU; JINESCU, 1971; GUPTA; MUJUMDAR, 1980; ERDÉSZ; OSMOS, 1986).

Esta vibração exercida no leito vibrofluidizado é comumente quantificada com o objetivo de facilitar o entendimento da operação, além de viabilizar o controle dessa vibração no processo. Na literatura existem diferentes formas possíveis de quantificar esta variável, porém o número adimensional de vibração ( $\Gamma$ ) é a maneira mais usada de mensurar essa agitação, conforme apresentado na equação 1 (CHLENOV; MIKHAILOV 1972):

$$\Gamma = \frac{A(2\pi f)^2}{g} \quad (1)$$

no qual A corresponde a amplitude, f a frequência vibracional e g a aceleração gravitacional.

Diante dos estudos encontrados sobre o leito vibrofluidizado, no princípio, o  $\Gamma$  era considerado como um parâmetro universal, essencial para determinar o comportamento fluidodinâmico. Entretanto, a partir dos resultados de Chen et al., (1991), despertou-se a ideia da não universalidade do adimensional de vibração, e desde de então os estudos começaram a ser realizados analisando o comportamento fluidodinâmico e o processo de secagem, mediante as diferentes combinações de A e f. Daleffe, Ferreira e Freire (2005), verificaram que um mesmo adimensional de vibração poderia produzir vários comportamentos fluidodinâmicos, dependendo da combinação de amplitude e frequência que foram ajustados no equipamento. A partir desta constatação, Meili et al., (2012), ao estudarem o comportamento fluidodinâmico e a secagem de diferentes tipos de pasta diante de duas combinações de amplitude e frequência, porém com o mesmo valor de  $\Gamma$ , comprovaram que um mesmo adimensional de vibração teve comportamentos fluidodinâmicos distintos e podem influenciar nos resultados obtidos durante o processo de secagem.

Mesmo diante do que foi comprovado sobre os diferentes comportamentos fluidodinâmicos para um mesmo valor de  $\Gamma$ , ainda foi verificado na literatura que muito precisa ser estudado sobre a influência que a agitação implementada no leito particulado, principalmente a amplitude e frequência vibracional, podem exercer tanto para o leito seco como para o leito na presença de uma pasta. Autores como Daleffe, Ferreira e Freire (2004) e (2005), verificaram que para a vibração com amplitude de 0,003m e frequência de 18,2 Hz, na presença do glicerol com diferentes graus de saturação, apresentaram curvas características muito próximas. Meili, Daleffe e Freire (2012) ao analisarem o comportamento dinâmico de um leito particulado com diferentes diâmetros de esferas de vidro, verificaram que quando foram utilizadas esferas de vidro com 0,00079m e diferentes combinações de amplitude e frequência, para  $\Gamma$  com os valores de 0,5 e 3,0, os comportamentos fluidodinâmicos ficaram praticamente idênticos. Liang et al., (2016), ao estudarem a fluidodinâmica de determinadas misturas de nanopartículas diante de diferentes intensidades de vibração, em que a amplitude de 0,003m foi combinada a cinco valores da frequência, observaram que algumas misturas binárias apresentaram curvas características bem próximas, mostrando que a frequência não influenciou no processo.

Com relação à influência que a agitação pode exercer no processo de secagem de pasta no leito vibrofluidizado, são poucos os trabalhos existentes na literatura que realizaram este tipo de análise, sendo apenas um trabalho que desenvolveu o estudo de secagem de pasta em leito vibrofluidizado, com o objetivo de verificar a influência da agitação imposta pelo equipamento, correspondendo a diferentes combinações de amplitude e frequência, poderia exercer no processo de evaporação de água e secagem do lodo de esgoto doméstico, leite desnatado e diferentes soluções de carbonato de cálcio, analisando o comportamento dinâmico das variáveis, temperatura de saída, nas umidades relativa e do pó produzido (MEILI 2009).

Desta forma, é possível observar que ainda existem indícios sobre o  $\Gamma$  que precisam ser consistente com relação ao desempenho do equipamento bem como nos resultados obtidos sobre a secagem de pasta. Com a finalidade de contribuir com os estudos sobre este leito, consolidando assim a descrição dos fenômenos envolvidos no processo de secagem, o objetivo deste trabalho consiste em analisar os efeitos que duas amplitudes (0,003m e 0,015m) combinadas as diferentes frequências, podem exercer no comportamento fluidodinâmico do processo, e também, no processo de secagem de pasta, onde pretende-se utilizar a água como “pasta” padrão e leite desnatado como pasta real. Em seguida, com os

dados experimentais obtidos, foi realizada a modelagem do processo de secagem de pasta utilizando um modelo híbrido CST/Rede Neural.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordadas informações importantes sobre os aspectos gerais do leito vibrofluidizado através das propriedades fluidodinâmicas, dos regimes operacionais e também sobre a secagem de pastas com auxílio de materiais inertes. Também neste capítulo serão comentados, de uma forma geral, a importância e as vantagens que o uso do modelo híbrido tem apresentado como ferramenta computacional para a descrição do processo de secagem.

#### 2.1 Aspectos gerais do leito vibrofluidizado

O leito vibrofluidizado (LVF) surgiu de uma adaptação realizada em um leito fluidizado convencional (LFC), através da inserção de uma energia vibracional ao sistema fluido-partícula com a finalidade de melhorar o contato entre o fluido e o material particulado envolvido. Com isso foi possível minimizar os caminhos preferenciais e formação de bolhas; permitir a fluidização de partículas muito pequenas; realizar a secagem de materiais pastosos, coesivos e adesivos; e também obter a uniformização da umidade no interior do leito durante o processo de secagem (GUPTA; MUJUMDAR 1980; FINZER; KIECKBUSCH 1992).

A vibração aplicada no sistema fluido-partícula pode ser gerada por dispositivos que são conectados a câmara do equipamento, denominados de vibradores, e são classificados conforme os mecanismos usados para desenvolver esta agitação. Uma das formas é através do vibrador mecânico de inércia, responsável pela força de excitação exercida por uma rotação de massas desequilibradas. O vibrador excêntrico é usado quando necessita-se de uma força de excitação mais intensa e de baixa frequência vibracional. O vibrador pneumático ou hidráulico é sugerido para altas frequências vibracionais, onde a vibração é gerada pelo movimento de um pistão com escoamento de ar ou líquido. Outro dispositivo usado quando

são necessárias agitação com alta frequência é o vibrador eletromagnético, em que a vibração é promovida pela atração de diferentes pólos do dispositivo, quando alimentado por uma corrente elétrica. O último dispositivo é o vibrador sonoro, que promove a agitação do material particulado quando o ar escoar em um gerador de som (FINZER; KIECKBUSCH 1992).

No entanto, Erdész, Mujumdar e Ringer (1986) ao estudarem o comportamento fluidodinâmico de um leito fluidizado vibrado, citaram algumas formas diferentes de promover a agitação no leito do material particulado, como por exemplo, a magnetização das partículas inertes via campo magnético ou pela pulsação do gás de fluidização que escoar no interior do material, metodologias diferentes das obtidas com o uso dos dispositivos citados anteriormente.

O leito vibrofluidizado tem-se mostrado um equipamento com possibilidades de aplicações industriais, como, na calcinação, nas reações exotérmicas, na secagem de sólidos e materiais pastosos, resfriamento de matérias granulares, revestimento de partículas (polímeros ou metais) e na granulação, podendo ser utilizado para operações presentes nas indústrias, química, alimentícia e farmacêutica. (ERDÉSZ; MUJUMDAR; RINGER 1986 e GUPTA; MUJUNDAR 1980).

Porém, como qualquer leito móvel, o leito vibrofluidizado também apresenta limitações durante o processamento de qualquer material, os quais dependem dos parâmetros que estão relacionados. Para este equipamento, a intensidade com que a agitação é exercida no sistema pode promover danos na estrutura do leito e também interferir na leitura das variáveis envolvida no processo. Outro fator limitante são as características do material inerte envolvido, que em conjunto com a agitação, podem desenvolver excessivos choques entre os mesmos e, por consequência, promover a instabilidade do leito, desenvolvendo uma má transferência de calor e massa, interferindo também na leitura das variáveis do processo. Uma vez que a circulação do material influencia de forma significativa nos fenômenos presentes. Mushtaev et al., (1972), por exemplo, relatam que o comportamento do leito particulado é alterado, quando as intensidades de agitação são superiores a 4, em que o material inerte deixa de se comportar de forma homogênea e a partir de então passam a desenvolver uma fonte de partículas no interior do leito (GUPTA; MUJUMDAR 1980).

Na literatura pode-se observar que um dos primeiros trabalhos realizados com o leito vibrofluidizado surgiu no ano de 1938 por Allis Chalmers, o qual mostrou a aplicabilidade comercial do equipamento quando o autor operou uma unidade de secagem para o minério de



molibidênio (GUPTA; MUJUMDAR, 1980). Em seguida, trabalhos sobre os mecanismos do leito começaram a surgir e foram realizados por Bachmann (1940), Kroll (1954) e Kroll (1955), onde focaram as pesquisas em descrever modelos matemáticos do comportamento dinâmico das partículas sólidas no interior do equipamento. Com relação aos estudos práticos, sobre a influência da vibração no sistema de partículas, os trabalhos pioneiros foram realizados por Chlenov e Mikhailov (1964 e 1972) (THOMAS et al., 1988). Desde então, aumentou-se o interesse em desenvolver pesquisas neste leito, a fim de estudar e procurar compreender os fenômenos envolvidos neste tipo de sistema, conforme são apresentados nos trabalhos de Bratu e Jinescu (1971), Gupta (1976), Gupta e Mujumdar (1980), Strumilo e Pakowski (1980), Malhorta et al., (1984), Erdész e Mujumdar (1986), Erdész e Ormos (1986), Thomas et al., (1988), Mori et al., (1990), Garim (1994), Daleffe (2002), Cruz et al., (2005), Lima e Ferreira (2012) e Meili (2009), Nunes et al., (2013), Perazinni et al., (2015), Liang et al., (2016).

### 2.1.1 Energia vibracional

Quando o leito vibrofluidizado apresenta uma vibração vertical, esta agitação é geralmente controlada usando como parâmetros a amplitude (A) e a frequência de vibração (f). Para quantificar a intensidade de agitação promovida no equipamento, foi observado que alguns autores propuseram diferentes maneiras de combinar estes parâmetros (CHLENOV; MIKAHAILOV, 1965, 1972; ZABRODSHIY et al., 1968; SHAH; GOEL 1980 e DORNEY et al., 1981). Entretanto, pode-se verificar que a equação habitualmente adotada para quantificar e caracterizar o comportamento do leito vibrofluidizado é o número adimensional de vibração, proposta por Chlenov e Mikahailov, conforme apresentado a seguir:

$$\Gamma = \frac{A(2\pi f)^2}{g} \quad (2)$$

Fisicamente esta equação representa uma relação entre a aceleração vibracional exercida e a aceleração gravitacional. Erdész e Mujumdar (1987) mencionam que ao multiplicar o parâmetro vibracional pela massa do sistema a ser vibrado, a equação torna-se a razão da força inercial pela força gravitacional.

Ao analisar os trabalhos existentes na literatura sobre os leitos vibrofluidizados, inicialmente os autores acreditavam que o comportamento dinâmico do material particulado dentro do equipamento era caracterizado apenas pelo valor do adimensional de vibração, sendo considerado, assim, um parâmetro universal, uma vez que não eram informadas as combinações entre  $A$  e  $f$  que correspondessem ao valor de  $\Gamma$  em questão (ERDÉSZ; ORMOS, 1980; ERDÉSZ; MUJUMDAR, 1986; ERDÉSZ; MUJUMDAR; RINGER, 1980). Erdész e Mujumdar (1986), por exemplo, analisaram a secagem de Rigeccocin e gel de hidróxido de alumínio utilizando dois tipos de materiais inertes, areia e a alumina, e informaram apenas os valores da vibração referente ao resultado obtido do comportamento dinâmico do leito, não apresentando nenhuma informação sobre  $A$  e  $f$ .

Os estudos de Mujumdar (1984) sobre o comportamento fluidodinâmico de um leito vibrado submetido a diferentes tipos de partículas, alturas do leito, valores de amplitude e frequência vibracional, indicaram que alguns valores de  $\Gamma$  foram semelhantes e tiveram diferentes combinações de  $A$  e  $f$ . Além desta observação, o autor também verificou que as curvas características tiveram comportamento bem distintos para os mesmos valores de  $\Gamma$ , sendo que, as combinações referentes às maiores amplitudes obtiveram menores valores de queda de pressão. Contudo, mesmo diante desta informação, o autor quando caracterizava o comportamento do leito diante das diferentes intensidades de agitação ( $\Gamma$ ) impostas, não exibiu as combinações de amplitude e frequência relacionadas.

Pesquisas mais recentes começaram a encontrar resultados semelhantes aos obtidos por Mujumdar (1984), verificando que os dados obtidos pelo autor não corresponderam apenas a um caso isolado, e apontaram que a amplitude e a frequência vibracional são fatores importantes durante a agitação do leito. Chen et al., (1991), advertiram sobre caracterizar a agitação do leito usando apenas o  $\Gamma$  como parâmetro, quando estudaram a característica da aglomeração de partículas de percolato de amônia em dois leitos vibrofluidizados, um com amplitude de 0,038m e um com amplitude de 0,026m. Os autores sugeriram que a amplitude e frequência têm a mesma importância para a prevenção do aglomerado de partículas.

Gallas et al., (1992) realizaram uma simulação dinâmica molecular de esferas de aço em leito vibrado, submetidas a diferentes intensidades de agitação. Estes autores quantificaram a vibração conforme o proposto por Shah e Goyel (1980) em que  $\Gamma^* = Af^2$ . Diante dos resultados, foi verificado que o adimensional não pode ser considerado um parâmetro para caracterizar o leito particulado sujeito a vibração, pois duas combinações de

amplitude e frequência apresentaram o mesmo valor do adimensional de vibração e comportamento fluidodinâmico distintos.

A partir destas observações, alguns autores começaram a verificar com mais detalhes os efeitos que as diferentes combinações que amplitude e frequência, podem exercer no comportamento dinâmico do leito e no processo de secagem. Kage et al., (1999) investigaram a dependência que a amplitude e a frequência exerceram na eficiência do revestimento de esferas de vidro, com pó de sílica e álcool polivinílico, e na tendência a aglomeração do material particulado em um leito vibrofluidizado. Os autores durante as análises da intensidade de agitação, praticamente não informavam a forma usada para quantificar a agitação no sistema, apresentavam apenas os valores de  $A$  e  $f$ , além de mostrarem que altos valores de amplitudes e frequência diminuem a eficiência do revestimento da esfera de vidro e evitam a formação de aglomerados do material particulado.

Daleffe, Ferreira e Freire (2005) estudaram o efeito da vibração no comportamento fluidodinâmico de esferas de vidro com diferentes diâmetros, tanto para o leito seco quanto para o leito na presença glicerol. O efeito da agitação no leito correspondeu aos valores do adimensional de vibração encontrados para diferentes combinações de amplitude e frequência. Os resultados mostraram que um mesmo valor  $\Gamma$  pode apresentar diferentes combinações de amplitude e frequência, além de obter comportamentos dinâmicos distintos do leito particulado. Perante estes resultados, os autores afirmam que o  $\Gamma$  deveria ser usado com muita cautela para caracterizar o comportamento do leito.

Daleffe, Ferreira e Freire (2008) analisaram a influência que um mesmo valor de  $\Gamma$ , correspondente a diferentes combinações de amplitude e frequência, exerceram em um leito vibrofluidizado durante a segregação de esferas de vidro. Quando analisaram a curva característica do leito particulado, verificaram tanto para o leito com diâmetro uniforme de esferas de vidro, quanto para o leito com misturas binária de partículas, que diferentes comportamento dinâmicos do material foram obtidos. Com relação a segregação do material particulado, foi observado que a combinação com a menor amplitude promoveu a segregação das esferas, porém quando a combinação de  $\Gamma$  apresentava amplitude maior, não foi observado a segregação das partículas. Estes resultados confirmam que um mesmo  $\Gamma$  pode influenciar na dinâmica do leito dependendo da combinação de  $A$  e  $f$ .

Perante os resultados obtidos pelos autores Daleffe, Ferreira e Freire (2005) e (2008) em seus trabalhos, Meili et al., (2010) resolveram analisar a influência que duas combinações

de amplitude e frequência que resultaram em  $\Gamma=4$ , exerceram na evaporação de água e na secagem do lodo de esgoto doméstico. Os resultados da evaporação de água confirmaram que as duas configurações de  $\Gamma$  utilizados influenciaram no processo. No entanto, durante a secagem do lodo de esgoto foi observado que as combinações dos parâmetros em questão não exerceram influência nas variáveis que caracterizam o processo. Mas, quando foi analisada a quantidade de pó recolhido na saída do ciclone, foi verificado pelos autores que diferentes taxas do pó produzidos foram obtidos para um mesmo valor de  $\Gamma$ .

Visto que ainda ficaram algumas lacunas diante dos resultados obtidos no trabalho anterior, Meili et al., (2012) analisaram então a influência que as duas combinações de A e f, referentes a  $\Gamma=4,0$ , poderiam exercer na dinâmica do leito particulado na presença de diferentes tipos de pastas, água, lodo de esgoto, leite desnatado e três concentrações de carbonato de cálcio. Os resultados obtidos confirmaram que um mesmo valor de  $\Gamma$  apresentou comportamentos fluidodinâmicos distintos, para todas as pastas trabalhadas. Além de mostrar que o tipo de pasta influenciou na vazão máxima de alimentação de pasta e na velocidade superficial do ar. Estes resultados confirmaram que o adimensional de vibração não pode ser usado como um parâmetro universal para caracterização da dinâmica do leito vibrofluidizado, sendo importante informar as variáveis amplitude e frequência.

Mesmo diante dos resultados encontrados, confirmando a inconsistência do adimensional de vibração como um parâmetro universal, ainda é possível observar na literatura que existem alguns resultados diante do comportamento dinâmico do leito vibrofluidizado, mostrando que muito ainda precisa ser estudado sobre este equipamento, em relação à intensidade de agitação imposta ao mesmo. Daleffe e Freire (2004) analisaram o comportamento fluidodinâmico do leito particulado sem pasta e na presença do glicerol, em um leito vibrofluidizado com câmara de seção retangular, quando submetidos a intensidades de agitação com amplitude de 0,003m e diferentes frequência vibracional. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que as curvas características do leito seco não foram influenciadas pela agitação do leito, uma vez que os patamares de queda de pressão ficaram muito próximas.

Meili, Daleffe e Freire (2012), estudaram o comportamento fluidodinâmico de um leito particulado de esferas de vidro com diâmetros inferiores a 0,001m, quando submetido a diferentes intensidades de agitação. As intensidades de agitação foram referentes às várias combinações de amplitude e frequência que pudessem corresponder a  $\Gamma$  igual a 0; 0,5; 1,0; 2,0 e 3,0. Diante dos resultados obtidos, foi possível observar que as esferas com  $78 \times 10^{-5}$ m

apresentaram curvas características de queda de pressão muito próximas, para as diferentes combinações que correspondessem a  $\Gamma=0,5$  e  $\Gamma=3,0$ .

Nunes et al., (2012) estudaram o comportamento dinâmico do leito particulado durante o processo de recobrimento de esferas de vidro com pó de bicarbonato de cálcio. Os resultados mostraram que o mesmo patamar de queda de pressão foi obtido para dois números do adimensional de vibração, que apresentam o mesmo valor de amplitude combinado com diferentes valores da frequência. Além de verificarem que não existiu uma única variável que influenciou verdadeiramente no processo de recobrimento de partículas, pois os resultados dependeram da combinação entre amplitude e a frequência durante a agitação do processo.

Liang et al., (2016) analisaram o comportamento fluidodinâmico de três combinações de mistura binárias de nanopartículas em um leito com área de seção circular e uma vibração exercida por um vibrador eletromagnético, impondo uma vibração com amplitudes de 0,003m e frequências variando de 0 a 40Hz. Diante dos resultados apresentados pelos autores, verificou-se que algumas misturas das nanopartículas tiveram suas curvas características apresentando patamares de queda de pressão com valores muito próximos, ou seja, diferentes intensidades de agitação apresentando comportamentos fluidodinâmicos do leito particulado muito semelhante.

Perante o que foi apresentado, fica claro que o número adimensional de vibração não pode ser considerado um parâmetro universal, além de confirmar a importância de informar A e f para caracterizar o comportamento do leito particulado. Porém também foi verificado que muito ainda precisa ser estudado sobre a influência que as combinações dos parâmetros vibracionais (A e f) exercem no comportamento do leito vibrofluidizado, uma vez que algumas curvas características mostraram que podem ter comportamentos semelhantes, obtidas para diferentes intensidades de agitação e diferentes tipos de materiais particulados.

### **2.1.2 Regime operacional.**

Na literatura o leito vibrofluidizado apresenta nomes diferenciados, como leito vibrado, leito fluidizado vibrado, leito vibrofluidizado, entre outros. Estes nomes estão relacionados com os diferentes regimes que foram caracterizados pelos pesquisadores e são dependentes das forças que influenciam no sistema e da intensidade da agitação imposta ao

equipamento, que por consequência, proporcionou ao leito particulado diferentes tipos de comportamento.

Bratu e Jinescu (1971) consideram o regime operacional apenas função da intensidade de agitação. Os autores definem o leito vibrado como sendo os que apresentam o  $\Gamma < 1$ , quando a força gravitacional é maior que a força vibracional, onde o leito comporta-se como um leito fluidizado ordinário, em que a vibração tem a função de homogeneizar o material particulado e aumentar a estabilidade das partículas. O leito vibrofluidizado corresponde ao regime que há igualdade na intensidade das forças vibracionais e gravitacionais,  $\Gamma \approx 1$ , ou seja, ambos a vazão de fluido e a vibração do sistema influenciam na fluidização do material particulado. O leito fluidizado vibrado corresponde ao regime com maior intensidade de agitação, pois  $\Gamma > 1$ , mostrando que a força vibracional é quem domina o processo.

Strumillo e Pakowski (1980) já apresentam outras considerações sobre os regimes operacionais do leito particulado e consideram apenas dois tipos de regimes: o leito vibrofluidizado e o leito fluidizado vibrado. O leito vibrofluidizado corresponde ao leito em que a vazão do fluido presente é menor que a velocidade de mínima fluidização. Porém, o leito fluidizado vibrado, apresenta uma velocidade do fluido muito maior que a velocidade de mínima fluidização.

Pakowski et al., (1984) apresentaram três regimes de comportamento, mostrando que além da intensidade de agitação, a velocidade do fluido também influencia no regime. O leito vibrado é considerado apenas para leitos com agitação maiores que 1 e sem escoamento do ar, mostrando que apenas a força vibracional domina o processo. O leito vibrofluidizado está relacionado aos leitos com intensidades de agitação maiores que 1, mas com um fluido escoando entre o material particulado, com velocidade menor que a velocidade de mínima fluidização. O leito fluido vibrado já corresponde a qualquer valor de  $\Gamma$ , porém com a velocidade do fluido superior a velocidade de mínima fluidização.

Erdész e Mujumdar (1987) apresentam uma classificação do regime de comportamento do leito particulado subdividido pela intensidade em que a vibração é implementada no leito, ou seja, o leito vibrado corresponde ao sistema que apresenta uma baixa intensidade de agitação,  $\Gamma < 1$ . O leito vibrofluidizado já é classificado por intensidades de agitação maiores, em que o  $\Gamma > 1$ , onde o material particulado alcança uma condição de pseudo-fluidizado, semelhante ao comportamento das partículas em leitos fluidizados convencionais na velocidade de fluidização.

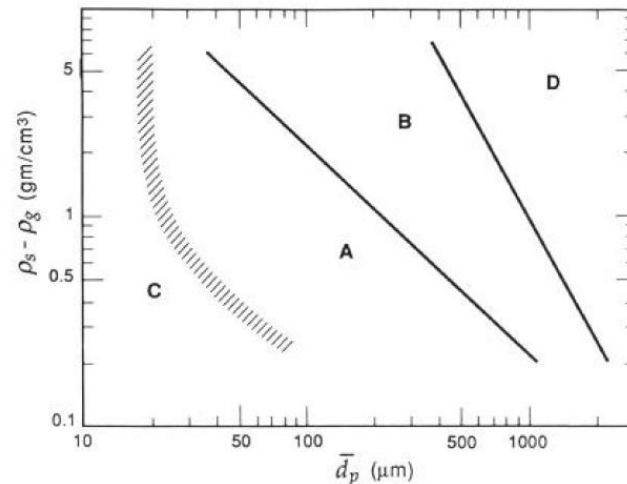
Daleffe (2002) diante destas tantas classificações dos regimes operacionais para um leito com agitação, resolveu apresentar uma classificação bem mais simples para estes regimes, com a finalidade também de uma universalização da linguagem. Para o autor, os leitos vibrados são classificados como os leitos que apresentam apenas a agitação do sistema, sem a presença de um fluido escoando no leito particulado. Os leitos vibrofluidizados correspondem aos leitos que apresentam além da agitação, um fluido atravessando o material particulado. Em ambos os regimes não existem limitações para as geometrias dos leitos e nem para os valores de adimensional de vibração.

### **2.1.3 Classificação das partículas**

O comportamento dinâmico do leito particulado são dependentes das características da partícula envolvida e, diante destas observações, Geldart (1973) realizou uma pesquisa e organizou os materiais particulados em grupos para facilitar a compreensão dos diferentes comportamentos do leito, obtidos quando fluidizados por um gás. Estes grupos foram divididos conforme as características físicas que as partículas apresentam e estão classificadas como mostrado no diagrama da figura 2.1. Na figura estão relacionadas, através de uma escala logarítmica, o diâmetro médio do particulado e a diferença da massa específica do sólido com a massa específica do fluido em questão. As quatro regiões foram denominadas pelas letras A, B, C e D, e o autor usou como critério a transição da região de leito fixo para a região de fluidização do material particulado.

O grupo A corresponde ao conjunto de partículas que apresentam pequenos diâmetros e massa específica menor que  $1,4\text{g/cm}^3$ . Neste tipo de partícula, o leito expande mais facilmente e apresenta a formação de pequenas bolhas. Os tamanhos destas bolhas tendem a aumentar a medida que a velocidade superficial do ar aumenta. Quando a velocidade do fluido é muito alta, o leito particulado começa a exibir a formação de slugging.

Figura 2.1: Diagrama de Geldart para a classificação das partículas.



Fonte: Adaptada de Geldart (1973).

O grupo B corresponde ao grupo que engloba materiais particulados maiores, que apresentam o diâmetro entre  $40 \times 10^{-6} \text{m}$  e  $500 \times 10^{-6} \text{m}$  e densidade entre  $4 \text{g}/\text{cm}^3$  e  $1,4 \text{g}/\text{cm}^3$ . Neste grupo a expansão do leito particulado é menor, quando comparado com as partículas do grupo A, e o surgimento de bolhas acontece logo após a velocidade de mínima fluidização. A circulação do material é promovida consideravelmente com o surgimento das bolhas no interior do leito. Para este grupo também há o surgimento de slugging quando o sistema alcança altas velocidades do ar.

O grupo C corresponde ao grupo em que o material particulado apresenta característica coesivas, correspondendo a partículas muito pequenas, úmidas ou um material pegajoso. Este tipo de material dificilmente consegue obter uma fluidização normal, sendo necessário o uso de agitação mecânica ou pela sublimação de sílica de tamanho submicrônico. A dificuldade de obter a fluidização para esta categoria de partícula está relacionada com as forças interparticulares presentes no leito, que são maiores do que a força que o fluido pode exercer no leito particulado.

O último grupo é o D, que engloba as partículas muito grandes e muito densas. Para este grupo há a necessidade de altas velocidades do gás para promover a fluidização do leito e apresentam uma pobre mistura dos sólidos. Durante o processo vai existir o surgimento de bolhas, porém estas bolhas são maiores e sobem mais lentamente do que o gás que escoar pelo material particulado. Se a vazão do ar alimentada dentro da câmara não for distribuída igualmente, sendo fornecida apenas em uma região específica, pode surgir o comportamento típico de leito de jorro, em que o material particulado é jorrado na região em que o ar foi



canalizado. Por se tratarem de um material particulado muito grande, estas partículas são frequentemente sugeridas para serem usadas em leito de jorro.

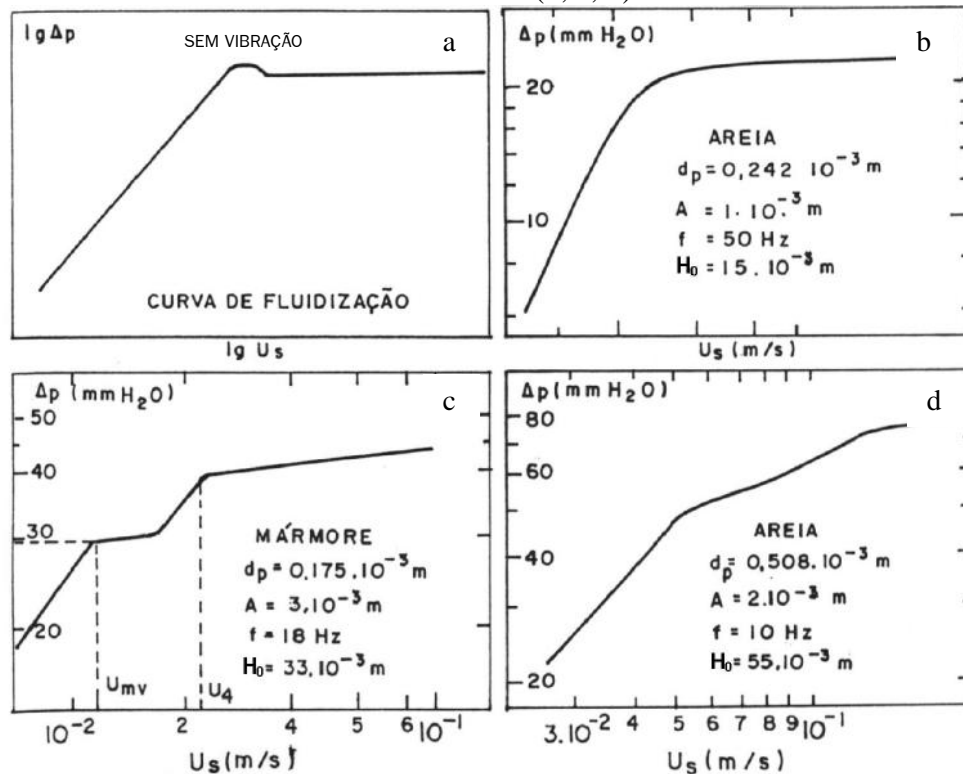
#### **2.1.4 Propriedade Fluidodinâmica**

Para compreender os fenômenos envolvidos durante o processo de um leito móvel, é importante analisar a interação entre o material particulado e o fluido que ocupam o equipamento, uma vez que já foi mostrado que o comportamento dinâmico do leito particulado é influenciado pelas características físicas da partícula presente. A forma de avaliar esta interação é através das curvas características, que correspondem às curvas de queda de pressão do leito em função da velocidade superficial do fluido que irá escoar através do material inerte. Como o leito vibrofluidizado corresponde a um leito móvel que apresenta não só o fluido como variável para promover a fluidização do leito particulado, mas também a vibração imposta ao sistema, nota-se que mais de um tipo de curva característica pode ser encontrada neste equipamento.

Na literatura, Bratu e Jinescu (1969) foram os primeiros autores a publicarem curvas características de leitos sujeitos a vibração (FINZER; KIECKBUSCH, 1992). No entanto foram os autores Strumillo e Pakowski (1980) que realizaram uma pesquisa mais detalhada do comportamento fluidodinâmico e mostraram que no leito vibrofluidizado é possível obter quatro tipos de curvas características, conforme mostrado na figura 2.2. Cada curva corresponde a uma relação entre as forças vibracionais e a força imposta pelo fluido envolvido no processo.

A curva “a” corresponde ao comportamento típico de um leito fluidizado convencional. Porém, quando um leito vibrofluidizado é submetido a uma intensidade de agitação baixa, em que  $(A\omega^2) < g$ , o comportamento dinâmico do mesmo se assemelha ao leito fluidizado convencional. No momento que o leito é submetido a altas intensidades de agitação, onde na intensidade vibracional  $(A\omega^2) > 9$ , o pico de pressão existente entre a transição do leito fixo para o leito fluidizado é amortecido, conforme mostrado na curva “b”.

Figura 2.2: Tipos de curvas características de um leito fluidizado convencional (a) e do leito vibrofluidizado (b, c, d).



Fonte: Adaptada de Strumillo e Pakowski (1980).

Quando o leito é submetido a intensidades de agitação com valores intermediários, as curvas podem apresentar comportamentos semelhantes a curva “c”, ou, “d”. A curva “c” mostra que o comportamento fluidodinâmico do material pode apresentar dois pontos de inflexão. O primeiro ponto corresponde ao momento em que inicia-se a movimentação das partículas, quando o sistema alcança a velocidade de mínima fluidização. O segundo ponto de inflexão, está relacionado as velocidades superficiais do ar superiores a  $u_4$ , não apresenta significado físico (FINZER; KIECKBUSCH, 1992). No entanto, Bratu e Jinescu (1971) acreditavam que nesta curva ocorriam mudanças do regime operacional durante o processo. Pois quando a velocidade do fluido era menor do que a velocidade de mínima fluidização, o primeiro ponto de inflexão da curva era considerado como o regime de leitos vibrados. Para as velocidades que estão entre a velocidade de mínima fluidização e o segundo ponto de inflexão da curva, esta região correspondia ao regime de leito vibrofluidizado. A partir do segundo ponto de inflexão, o ar que escoava pelo material particulado sustentava as partículas e correspondia ao regime de um leito fluidizado-vibrado. Entretanto, foi verificado que a velocidade referente ao segundo ponto de inflexão era dependente da frequência vibracional, pois ao aumentar a frequência de vibração, mantendo a mesma amplitude, a velocidade tendia

a velocidade de mínima fluidização e a curva “c” se transforma na curva “b” (STRUMILLO; PAKOWSKI, 1980).

A curva “d” mostra um comportamento de partículas submetidas a baixos valores de intensidade de agitação, em que a transição da região de leito fixo para o leito fluidizado não ocorre em uma dada velocidade, mas sim em uma faixa da velocidade superficial do fluido. Nesta curva os autores também consideravam que este comportamento da curva característica promovia uma mudança no regime operacional, pois o primeiro ponto de inflexão era referente ao regime de vibrofluidização. No segundo ponto de inflexão, correspondia ao início da fluidização e era considerada como o regime do leito fluido vibrado.

No entanto, nas curvas características foi observado que as partículas envolvidas apresentam características físicas diferentes, além de alturas estáticas de leitos bem discrepantes de uma curva para outra. Por consequência, estes resultados mostraram que as curvas características são influenciadas não só pela intensidade de vibração e pela velocidade superficial do fluido, mas também pelas características físicas do material particulado e pela quantidade de material compreendida no processo.

Muitos trabalhos foram publicados de 1971 até os dias atuais, sendo possível verificar que o comportamento fluidodinâmico do leito particulado está relacionado com a intensidade de vibração imposta ao sistema, com as características das partículas, quantidade de material particulado e a velocidade do fluido. Nos quadros 2.1 e 2.2 serão apresentados alguns trabalhos que direcionaram suas pesquisas para analisar o comportamento fluidodinâmico do leito diante de diferentes tipos de materiais particulados, alturas de leito e intensidades de agitação, a fim de se ter uma visão geral dos resultados obtidos até o momento. Infelizmente a maioria destes trabalhos apresentam seus resultados em função apenas de  $\Gamma$  e, como vimos, isso pode conduzir a erros.

Quadro 2.1: Estudos sobre a fluidodinâmica do leito vibrofluidizado.

Referência	Condições operacionais	Tipo de partícula	Resultados significantes
Bratu e Jinescu (1971)	$D_m < 0,5\text{mm}$ ; $f=0, 18, 26$ e $35\text{ Hz}$ ; $A=0-3\text{cm}$	Mármore, sílica gel e poliestireno	- Diferentes comportamentos das curvas características foram obtidos dependendo do valor de $\Gamma$ aplicada no sistema; - $\Delta p$ e $U_{mf}$ foram reduzidas com a adição da vibração no sistema; - O aumento do $D_m$ promoveu a redução da $\Delta p$ referente a fluidização;
Gupta e Mujumdar (1980)	$D_m=0,9-3,9\text{mm}$ ; $f=0$ e $105\text{Hz}$ ; $A=0$ e $42\text{mm}$ e $H=10-12\text{mm}$	Peneira molecular, Sílica gel, semente de mostarda e partículas de polietileno	- A agitação no leito promoveu uma $\Delta p$ menor do que obtida no LFC. - O aumento de $\Gamma$ promoveu o aumento da $U_{mf}$ ; - O aumento de $\Gamma$ promoveu a redução da $U_{mm}$ ; - A partículas com maiores $D_m$ foram mais influenciadas pela agitação do que as partículas com menores $D_m$ ; - A $\rho$ das partículas envolvidas não influenciaram no comportamento dinâmico do leito.
Erdész, Mujumdar e Ringer (1986)	$D_m=1,5 \times 10^{-4}$ - $27,5 \times 10^{-4}\text{m}$ ; $\rho=1,05$ - $2,63\text{g/mm}^3$ ; $H=0,06\text{m}$ - $0,14\text{m}$ $\Gamma=0-13$	Areia, poliestireno, sal e açúcar.	Os dados usados pelos autores mostraram que: para $\Gamma < 1$ a $\Delta p$ do leito aumentou, para $\Gamma > 1$ a $\Delta p$ diminuiu; - A $U_{mf}$ incipiente diminuiu com o aumento de $\Gamma$ ; - A porosidade do leito diminuiu para $\Gamma \leq 1$ , em seguida aumenta para valores $\Gamma \leq 5$ , e tendem a apresentar um flutuação na porosidade para valores de $\Gamma$ até 13.
Mujumdar (1984)	$f=0-160\text{Hz}$ ; $A=0-4,25\text{mm}$ ; $H=25-125\text{mm}$	Polietileno (próximo de um esferas) e peneiras moleculares	-Verificou-se que a $U_{mm}$ diminuiu com o aumento da $\Gamma$ . - Partículas muito grandes só apresentaram influência da vibração para $\Gamma > 4$ . - $\Gamma < 1$ apresentam uma queda de pressão maior do que encontrado em LFC. -Com o aumento da $H$ , a $\Delta p$ só se torna menor quando comparado com o LFC apenas para altos valores de $\Gamma$ ; - Partículas não esféricas, o efeito de $\Gamma$ é menos pronunciado do que encontrada em partículas esféricas. - A amplitude influenciou mais na redução $\Delta p$ .
Erdész e Ormos (1983)	$D_m=0,15$ - $0,8\text{mm}$ ; $A=0,6-1,85\text{mm}$ ; $f=0-267\text{Hz}$ ; $\Gamma=0-13,4$ ; $H=100-120\text{mm}$ .	Areia	- Para $\Gamma \leq 1,5$ , os valores de $\Delta p$ foram maiores, independente da altura estática do leito particulado. - $\Gamma > 1,5$ os valores de $\Delta p$ começaram a reduzir, também independente da altura do leito. - A medida que aumentou $H$ do leito estático, aumentou-se os valores de $\Delta p$ .
Camargo (1998)	$H=5, 7$ e $9\text{cm}$ ; $D_m= 700, 1100, 1800$ e $3700\ \mu\text{m}$ ; $A=1,2; 1,55$ e $1,98\text{mm}$ ; $f=0-10\text{ Hz}$ ; $U_s=0$ e $0,8\text{m/s}$	Esferas de vidro	- O aumento de $D_m$ aumentou os valores de $U_{mf}$ . -Ao aumentar a $H$ do leito, os valores de $\Delta p$ aumentaram; -O aumento da amplitude promoveu o aumento da $U_{mf}$ , quando trabalhou com a maior $f$ . -Para o maior $D_m$ , a vibração exercida não foi suficiente para alcançar a $\Delta p_{mf}$ .
Jinescu et al., (2000)	$A=1-2\text{mm}$ ; $f=5-50\text{Hz}$ ; $\Gamma=1-20,1$ ; $H/D=0,3-1,25$ ;	Persulfato de potássio	- Para todas as razões de $H/D$ , foi verificado que a $\Delta p$ e $U_{mf}$ diminuíram com o aumento de $\Gamma$ . - O aumento da razão de $H/D$ promoveu o aumento da $\Delta p$ e na $U_{mf}$ ;
Mawatari et al., (2002)	$D_m=6 \times 10^{-6}$ - $100 \times 10^{-6}\text{m}$ ; $f=30-50\text{Hz}$ e $A=0,5-1,5\text{mm}$	Esferas de vidro Fluido=gás de nitrogênio	- O aumento do $D_m$ promoveu a redução da $\Delta p$ ; - Para as partículas do grupo C de Geldart, o aumento de $\Gamma$ promoveu a redução da $U_{mf}$ ; -Para as partículas do grupo A de Geldart, o aumento de $\Gamma$ não influenciou na $U_{mf}$ .

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 2.2: Continuação do Quadro 2.1

Referência	Condições operacionais	Tipo de partícula	Resultados significantes
Oliveira Jr (2003)	$D_m = 3,095\text{mm}$ e $2,595\text{mm}$ ; $H=7, 9$ e $11\text{cm}$ ; $A=1, 2$ e $3\text{mm}$ ; $f=5, 7$ e $10\text{Hz}$ $\Gamma=0-1,5$	Alumina e sílica gel	- Ao aumentar a $H$ , aumentou-se a $\Delta p$ , independente do valor de $\Gamma$ ; - Quando comparadas as diferentes $A$ , combinadas a mesma $f$ , a agitação não influenciou significativamente os valores de $\Delta p$ . - O aumento do $D_m$ promoveu uma redução da $\Delta p$ e aumento da $U_{mf}$ . - O aumento de $\Gamma$ , reduziu a $\Delta p$ .
Daleffe, Ferreira e Freire (2005)	$D_m=1,10; 2,19$ e $3,68$ mm; $H=9\text{cm}$ ; $A=0-0,021\text{m}$ ; $f=0-18\text{Hz}$	Esferas de vidro e glicerol	- As curvas características mostraram que as diferentes combinações de $A$ , $f$ e $D_m$ da esfera de vidro influenciaram na $\Delta p$ e na $U_{mf}$ , mas quando o leito apresentava o glicerol em diferentes graus de saturação, não observou-se influencia de $\Gamma$ com a $\Delta p$ e $U_{mf}$ . - O aumento do $D_m$ , promoveu o aumento de $U_{mf}$ ;
Xu e Zhu (2006)	$D_m=4,8-216$ Am; $F=0-50\text{Hz}$ ; $A=0-3\text{mm}$ ; $H=10\text{cm}$ Ângulo de vibração= $0-90^\circ$	Trióxido de alumínio, dióxido de titânio, $\text{CaCO}_3$ e esferas de vidro	- Para o leito com agitação, independente do $D_m$ , a $U_{mf}$ foi menor do que obtido nos LFC. - Ao manter a $A$ e aumentar a $f$ , verificou-se uma redução da $U_{mf}$ até $30\text{Hz}$ , depois a $U_{mf}$ só tornou-se maior com a vibração. - O aumento do $D_m$ , diminui a efetividade da vibração e promove o aumento da $U_{mf}$ . - A irregularidade das partículas aumenta a porosidade do leito particulado quando sujeito a vibração;
Jin, Zhang e Zhang (2007)	$D_m=0,3\text{mm}-1,64\text{mm}$ ; $f=0-45\text{Hz}$ ; $A=0-1,0\text{mm}$ ; $H=0,1-0,4\text{m}$	Painço, resina, esfera de vidro e areia.	- A amplitude do leito apresentou mais influência na porosidade do leito particulado; - O leito com agitação, o aumento da $H$ pode promover a redução da porosidade do leito.
Lima e Ferreira (2011)	$A=0,4\text{cm}$ e $0,5\text{cm}$ ; $\Gamma=0,5$ e $1$ ; $P_p=0,95-0,52\text{g/cm}^3$ ; $H=3,5$ e $4,5\text{cm}$ ; $\phi = 0,063-0,213$ .	Folhas de <i>Duranta repens</i> , <i>Schinus molle</i> , <i>Coleus barbatus</i> , <i>Buxus sempervirens</i> , <i>Bougainvillea spectabilis</i> e papel.	- A agitação do leito diminuiu a $\Delta p$ dos leitos não esféricos, quando comparado com a $\Delta p$ obtida em LFC; - Não verificado um tendência para a $U_{mf}$ com o $\Gamma$ pois seus valores ficaram muito perto, independentemente do tipo de folha trabalhada.
Nunes et al., (2012)	$D_m=...$ $f=0-360$ rpm; $A=0,5-2\text{cm}$	Pó de bicarbonato de sódio e esferas de vidro	Diferentes combinações de $A$ e $f$ , resultaram no mesmo patamar de $\Delta p$ ; - A $U_{mf}$ foi menor quando comparado com LFC;
Meili et al., (2012a)	$D_m=2,19\text{mm}$ ; $H=9\text{cm}$ ; $A=3$ e $15\text{mm}$ e $f=8$ e $18\text{Hz}$	Esferas de vidro Água, leite desnatado, lodo de esgoto, $\text{CaCO}_3$ (3%, 6% e 9% de conc. de sólidos).	-A amplitude influenciou na oscilação de $\Delta p$ no interior do leito; - Além da $A$ , foi verificado que as características da pasta também influenciam na oscilação da $\Delta p$ , da velocidade do fluido e na vazão máxima de alimentação da pasta envolvida.
Meili, Daleffe e Freire 2012	$D_m=0,46\text{mm}$ e $0,78\text{mm}$ ; $A= 1,4-3,2\text{cm}$ ; $f=118-439$ RPM	Esferas de vidro	- Não foi observada influência da combinação de $A$ e $f$ para as curvas de $\Delta p$ referentes as esferas de maior $D_m$ ; - Maiores $A$ apresentaram menores valores de $\Delta p$ e maiores valores $U_{mf}$ .
Liang et al., 2016	$D_m= 10-30\text{nm}$ $H=40\text{mm}$ $A=0,003\text{m}$ ; $f=0-40\text{Hz}$ ;	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ , $\text{SiO}_2$ , $\text{TiO}_2$ e $\text{ZnO}$	- Para as misturas binárias, a razão mássica de cada nanopartículas no leito particulado influenciou nos valores de queda de pressão; - Houveram misturas binárias que o aumento da frequência não interferiu no comportamento fluidodinâmico.

Fonte: Elaborado pelo autor.

De um modo geral foi possível observar que a queda de pressão é fortemente dependente da intensidade com que a vibração é exercida no equipamento, das características físicas do material particulado e da altura do leito estático. Ao analisar a influência da vibração implementada no equipamento, foi verificado que dependendo da intensidade dessa agitação podem ocorrer a compactação do material particulado presente ou deixar este material mais solto. Os valores que correspondem a essa transição de comportamento entre um leito compacto e o leito solto esta em torno de  $\Gamma \cong 1$ , uma vez que Gupta e Mujumdar (1980) verificaram esta transição em  $\Gamma=1$  e Erdész e Ormos (1983) verificaram esta transição em  $\Gamma=1,5$ . Com relação à influência dos parâmetros que compõem o número adimensional de vibração, a amplitude ou a frequência, exercem nas curvas características, foi observado que a amplitude exerceu uma influência mais significativa do que a frequência vibracional na queda de pressão.

Sobre a influência exercida pelas características físicas do material particulado sobre a curva característica (massa específica, diâmetro e esfericidade), foi observado que as partículas mais densas tendem a apresentar maiores valores de queda de pressão, visto que o fluido irá necessitar de maior força de arraste para sustentar esta partícula. A respeito da influência exercida pelo diâmetro do material particulado foi verificado por Bratu e Jinescu (1971), Mawatari et al., (2002), Oliveira Jr. (2003) que o aumento do diâmetro, promoveu uma redução na queda de pressão quando o leito foi submetido à agitação. Já autores como Gupta e Mujumdar (1980), Mujumdar (1984) e Meili, Daleffe e Freire (2012) observaram para as intensidades de agitação trabalhadas, que o diâmetro do material particulado não exerceu uma influência significativa nos valores de queda de pressão do leito. Sobre a esfericidade foi verificado que quanto mais longe do formato de uma esfera, maior será a expansão e a porosidade do leito do material particulado, quando comparado com partículas 100% esféricas (LIMA E FERREIRA 2011). No entanto, para a altura do leito particulado foi verificado uma única tendência para os valores e comportamento da queda de pressão obtida pelos pesquisadores. Os resultados encontrados por Erdész e Ormos (1983), Camargo (1998), Jinescu et al., (2000) e Oliveira Jr (2002) mostraram que quanto maior a altura do leito, maiores os valores da queda de pressão ( $\Delta p$ ) ao longo do processo e da  $\Delta p$  referente à mínima fluidização, podendo chegar a uma determinada altura em que a vibração deixa de ser efetiva e não mais influenciará no processo.

Nos leitos vibrofluidizados com a presença de pasta, foi verificado uma alteração no comportamento da curva característica e nos valores referentes à mínima fluidização. Pois

Daleffe, Ferreira e Freire (2005) verificaram que a presença de pasta no leito particulado promoveu um agrupamento das curvas, quando o mesmo foi submetido a diferentes intensidades de agitação, mostrando que o comportamento do material particulado foi semelhante e não influenciou na queda de pressão. A pasta também influenciou na oscilação da queda de pressão obtida no período transiente do processo de secagem, bem como na operacionalidade do leito (mostrando as condições que o leito deixa de promover a fluidização, devido à quantidade de pasta).

Ao analisar a influência que a agitação ajustada no equipamento pode exercer na velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ), observou-se que praticamente não existiu uma tendência bem definida entre os resultados obtidos pelos diversos autores apresentados nos quadros 2.1 e 2.2. Pois conforme os dados obtidos por Gupta e Mujumdar (1980), Camargo (1998) e Meili, Daleffe e Freire (2012), os autores mostraram que o aumento de  $\Gamma$  promoveu o aumento da  $U_{mf}$ . Porém Erdész, Mujumdar e Ringer (1986) e Mawatari et al., (2002) encontraram resultados opostos, em que o aumento da vibração resultou na redução da  $U_{mf}$ . Xu e Zhu (2006), por sua vez, obtiveram os dois comportamentos citados anteriormente neste mesmo trabalho, ou seja, a  $U_{mf}$  teve uma redução à medida que o  $\Gamma$  aumentava de zero até um valor específico. Em seguida a velocidade de mínima fluidização aumentou, conforme os valores de  $\Gamma$  tornavam-se ainda maiores. No entanto como se trata de trabalhos que utilizaram diferentes intensidades vibracionais e diferentes materiais particulados, estes fatores devem ter favorecido a não existência de uma tendência do comportamento desta variável.

Com relação à interferência que as características físicas do material particulado exerceram na  $U_{mf}$ , foi observada uma única tendência para o diâmetro médio ( $D_m$ ) da partícula, pois o aumento do  $D_m$  resultou no aumento da  $U_{mf}$ . A respeito da forma do material particulado, Lima e Ferreira (2011) ao analisarem materiais particulados que apresentam baixa esfericidade, observaram para a intensidade de agitação trabalhada os valores de  $U_{mf}$  ficaram muito próximos, mostrando que esta variável não sofre interferência deste tipo de partícula quando a agitação foi aplicada no sistema.

Esta incoerência encontrada nos resultados para a  $U_{mf}$  pode estar relacionada com a metodologia usada pelos autores em seus trabalhos para determiná-la, uma vez que não existe uma metodologia específica para estabelecer a velocidade de mínima fluidização em leitos vibrofluidizados. Na literatura, a grande maioria dos trabalhos usa o procedimento empregado em leitos fluidizados convencionais, que corresponde à inserção de duas retas tangentes à curva da queda de pressão em função da velocidade superficial do fluido. Uma reta tangente à

região referente ao leito fixo e a outra na região de fluidização do material particulado. No entanto, para Daleffe (2005) esta metodologia pode ser considerada questionável. Principalmente, quando as condições vibracionais empregadas no leito vibrofluidizado proporcionarem uma curva que não apresenta só uma velocidade que corresponda a transição do comportamento do leito, mas abrange um intervalo de velocidades superficiais do ar para que aconteça esta transição.

Como os resultados obtidos de  $U_{mf}$  usando esta metodologia apresentaram dados que não tem coerência física, alguns autores resolveram propor outras metodologias ou equações empíricas para assim ser possível determinar a velocidade de mínima fluidização em leitos com agitação de uma forma mais coesa (BRATU; JINESCU, 1971; ERDÉSZ; MUJUMDAR, 1987; GUPTA; MUJUMDAR, 1980; JINESCU et al., 2000; MUSHTAYEV et al., 1972; RINGER; MUJUMDAR, 1984). Gupta e Mujumdar (1980), por exemplo, propuseram e introduziram o conceito de velocidade de mínima mistura ( $U_{mm}$ ). Esta variável era determinada visualmente no instante em que iniciavam o movimento do material particulado. Com esta nova metodologia os autores verificaram que o aumento da vibração do leito promoveu a redução da  $U_{mm}$ .

Mesmo a metodologia proposta por Gupta e Mujumdar (1980) apresentando resultados com coerência física, alguns autores a consideraram muito subjetiva e muito dependente do observador, portanto sujeita a grandes erros (MUJUMDAR, 1984, GARIM; FREIRE; 1994). Por isso Mujumdar (1984) comenta em suas conclusões que os resultados obtidos de  $U_{mm}$ , usando este procedimento, deveriam ser considerados com muita cautela.

Outra ferramenta é apresentada por Garim (1998), quando o mesmo analisava as flutuações de queda de pressão durante a obtenção das curvas características de um leito particulado constituídos de esferas de vidro, pode auxiliar na determinação do instante que correspondeu ao início da movimentação do material particulado presente no leito. Esta metodologia consistiu na construção das curvas do desvio padrão de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar e acabou tornando-se uma ferramenta complementar na análise do comportamento fluidodinâmico do leito particulado, possibilitando indicar a velocidade referente ao início da fluidização do material envolvido no sistema.

Diante do que foi comentado sobre a velocidade de mínima fluidização e dos possíveis impasses que foram mencionados por alguns autores sobre o uso da metodologia da velocidade de mínima mistura, que Daleffe (2002) sugeriu utilizar simultaneamente, para determinar esta variável em leitos vibrofluidizados, as curvas características clássicas e as



curvas de desvio padrão de queda de pressão em função da velocidade superficial do fluido, incorporadas com observações visuais do início da movimentação das partículas.

## **2.2 Secagem de pasta em leito vibrofluidizado**

As pastas são matérias primas que compreendem um sistema sólido-líquido as quais apresentam em sua constituição uma grande quantidade de água, onde ficam difundidas as partículas microscópicas, ou partículas coloidais (Weltman 1960). Devido a esta grande quantidade de água, comumente realiza-se a secagem deste tipo de material usando os leitos móveis constituídos de partículas inertes. O objetivo do particulado inerte durante o processo é funcionar como um suporte para a pasta, que será inserida na câmara de secagem, e também como uma fonte extra de calor, tornando possível alcançar altas taxas de transferência de calor e massa (MUJUMDAR, 2006; FREIRE et al., 2012).

A descrição do processo de secagem de pasta com auxílio de partículas inertes em um leito vibrofluidizado, de um modo geral, é semelhante à descrição desta operação realizada em outros leitos móveis como no leito de jorro, no leito de jorro diluído (Jet), no leito de jorro mecânico ou no leito fluidizado. O que vem diferenciar um processo do outro são as variáveis operacionais envolvidas em cada equipamento utilizado. No caso do leito vibrofluidizado, além das variáveis, temperatura do ar, vazão do fluido e vazão de alimentação da pasta, ainda vai existir a agitação implementada no equipamento, responsável por aumentar ainda mais a complexidade do processo.

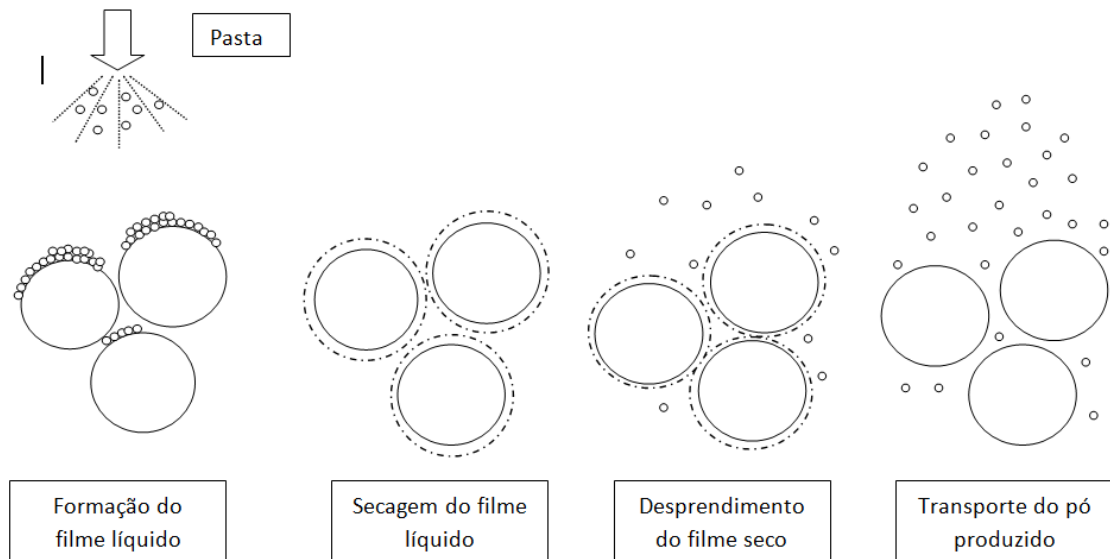
Nesta operação um fluido aquecido é inserido na base do leito, responsável por uma pequena movimentação ascendente do material particulado e também pelo aquecimento do mesmo. Assim que o novo regime é alcançado, a pasta então é alimentada no interior do leito particulado e rapidamente adere à superfície do material. À medida que a quantidade de pasta aumenta na câmara de secagem, a mesma começa a recobrir as partículas inertes, desenvolvendo uma fina película de pasta.

Como a alimentação de pasta só inicia-se quando o leito particulado encontra-se previamente aquecido pelo fluido, à secagem desta fina camada de material ocorre pela energia transferida da partícula para a pasta por condução e pela energia transferida por convecção do fluido aquecido para a camada de pasta. O fornecimento de energia faz com que

a água presente nesta fina camada seja evaporada e transferida para o fluido na forma de vapor, por consequência, o filme envolvido no inerte irá secar e se tornará frágil e quebradiço.

A umidade final atingida pela camada corresponde a um nível crítico em que o movimento do material particulado, devido ao fluido e a agitação promovida pelo equipamento, geram sucessíveis colisões entre a partícula-partícula, a partícula-pleno do leito e a partícula-parede, responsáveis pela destruição do filme seco e produção do pó. Por fim, este pó é transportado pela corrente de fluido e coletado por um ciclone, ou qualquer outro dispositivo responsável pela separação do material (FREIRE et al., 2012). Para que se tenha uma visão geral do processo de secagem de pasta, a figura 2.3 mostra um esquema simplificado da secagem mecânica de pasta sobre a partícula inerte.

Figura 2.3: Esquema do processo de secagem de pasta em leito vibrofluidizado com partículas inertes.



Fonte: Acervo pessoal.

Como a alimentação de pasta ocorre constantemente no interior do leito vibrofluidizado, pode-se considerar que este procedimento acontece de uma forma cíclica, dividida em quatro etapas principais que ocorrem simultaneamente: a formação de camada fina de pasta na superfície do inerte, a secagem deste revestimento, a quebra ou fratura do filme seco e o transporte do pó produzido. Destas etapas, apenas duas controlam significativamente o processo de secagem, correspondendo, a secagem do filme líquido e o desprendimento do filme seco. Logo, para que o processo de secagem de pasta aconteça de forma estável, à velocidade com que a água evapora deve ser satisfatória para evitar a aglomeração do material particulado e, por consequência, a extinção do mesmo. Ao mesmo

tempo, a atrição e a colisões interparticulares devem ser suficientes para impedir que a espessura do filme seco aumente, promovendo apenas o recobrimento do material particulado (MATHUR; EPSTEIN, 1974; FREIRE; FERREIRA; FREIRE, 2011).

Visto que a espessura da película de pasta é muito fina e a quantidade de água presente neste tipo de material é muito grande, a secagem de pasta em leito vibrofluidizado acontece principalmente à taxa constante, ou seja, a evaporação da água é a etapa limitante no processo de secagem, uma vez que a película de material na superfície da partícula inerte é tão ínfima que a resistência à transferência de massa por difusão do líquido é considerada inexistente (FREIRE; FERREIRA; FREIRE 2009; FREIRE et al., 2012).

Nesta operação também existem outros fatores que exercem influência no processo, como a interação entre o fluido e o material particulado, que irá promover o desenvolvimento de forças sobre a partícula, como a força peso, força da gravidade e força de arraste, as quais influenciam na circulação do inerte no interior da câmara de secagem. Além destas forças, na interação entre a película de pasta que recobre o material inerte e o fluido irá atuar a tensão de cisalhamento sobre a pasta, consequência do atrito proporcionado pela propagação da quantidade de movimento que o fluido exerce no filme líquido. Este tipo de força está diretamente influenciada pela viscosidade da pasta e a velocidade do fluido, fatores que também interferem nas características da camada limite desenvolvida ao redor do material inerte (BACELOS, PASSOS e FREIRE 2007; FREIRE et al., 2012).

Na interface pasta-partícula, a interação acontece principalmente devido a força de adesão que permite a pasta, inserida no leito, se prenda a superfície do material inerte. Este tipo de interação é considerada bastante complexa por se tratar de uma relação físico-química que age em escala molecular. No entanto, no processo de secagem de pasta, a força de adesão interfere diretamente nas etapas de revestimento da pasta na superfície do material inerte e na etapa de remoção da pasta seca. Segundo Freire, Ferreira e Freire (2011), sua magnitude é resultado de interações químicas, mecânicas ou moleculares do processo, mas principalmente é dependente das propriedades do substrato e da superfície do material particulado envolvido.

Para poder compreender ainda mais o processo de secagem de pasta em leito vibrofluidizado, serão apresentados a seguir os trabalhos presentes na literatura que realizaram a secagem de diferentes tipos de pasta neste equipamento, quando o mesmo foi submetido a diferentes intensidades de agitação. Primeiramente, ao analisar os trabalhos que realizaram a secagem em leito vibrofluidizado, verificou-se que poucos foram os que abordaram e analisaram a secagem de pasta com auxílio de materiais inertes. A grande

maioria dos estudos publicados tratava-se da secagem de materiais porosos ou granulares, de diferentes formas, onde avaliavam principalmente o comportamento fluidodinâmico do leito. Quando os autores analisam a cinética de secagem ou a qualidade do produto final, grande parte dos trabalhos procurava verificar a influência que a agitação exercia no equipamento pode promover no processo de secagem, em relação a um leito sem agitação.

Um dos primeiros pesquisadores que publicaram um trabalho em que estudou-se a secagem de uma dada pasta com partículas inertes em um leito vibrofluidizado, não analisou os fenômenos de transferência de calor e massa do processo, mas sim o comportamento fluidodinâmico do leito durante a secagem. Chevilenko et al., (1979) ao estudarem a evaporação de água no leito vibrofluidizado, variando a quantidade deste material no meio particulado e a intensidade de agitação implementada no leito, verificaram que a velocidade de mínima vibrofluidização foi influenciada por estas duas variáveis. De acordo com os resultados obtidos pelos autores, o aumento da quantidade de água no meio proporcionou o aumento da velocidade de mínima vibrofluidização. Ao aumentarem a amplitude da agitação, a velocidade de mínima vibrofluidização teve o mesmo comportamento, mas não na mesma proporção. Ou seja, o aumento da amplitude promoveu o aumento da velocidade referente à mínima fluidização do leito com agitação, porém menos acentuado do que os resultados obtidos pelo aumento da quantidade de água no leito de inerte.

Erdész e Ormos (1986) analisaram a secagem de Rigeccocin e do gel de hidróxido de alumínio no leito vibrofluidizado utilizando dois tipos de materiais inertes (a areia e a alumina) e diferentes intensidades de agitação ( $\Gamma$  variando de 0 a 9). Porém os autores não informaram quais as combinações de amplitude e frequência que foram empregadas no equipamento para o desenvolvimento do trabalho. Diante dos resultados obtidos, os mesmos observaram que a eficiência da secagem tornou-se maior com o aumento da intensidade de agitação no processo, uma vez que facilitou as transferências de calor e massa. Além de observar também que o aumento do diâmetro e densidade do material inerte também promoveu o aumento da eficiência de secagem, pois estes fatores aumentaram o efeito abrasivo do leito particulado, facilitando a remoção da camada de filme seco da superfície do inerte.

Novy e Kieckbusch (1988) realizaram a secagem de leite em pó reconstituído, variando o diâmetro da esfera de vidro, a concentração em massa de leite em pó na solução e a temperatura do processo. Os resultados obtidos mostraram que o aumento do diâmetro do material inerte apresentou mais influência na taxa de secagem do que as outras variáveis

analisadas. Neste trabalho, os autores também não forneceram os valores das variáveis amplitude e frequência usadas no processo, no entanto deixam claro que a vibração exercida pelo equipamento foi de extrema importância para evitar a aglomeração do material envolvido.

Pan et al., (1995) realizaram a secagem de suspensões de bactérias de fotossíntese a temperatura de 85°C, usando dois tipos de inertes, areia e farelo de trigo. Os resultados encontrados pelos autores mostraram que o farelo de trigo possibilitou alcançar maiores valores da umidade relativa do ar durante o processo, sem aglomerar o material particulado. Ao compararem os dados obtidos do leito vibrofluidizado com os dados do leito fluidizado convencional, observaram que a agitação implementada no equipamento possibilitou o uso de menores vazões de ar para o material particulado alcançar a fluidização. Além de observarem que a agitação facilita a fluidização de materiais não esféricos e diminui a segregação dos mesmos. No entanto, neste trabalho a vibração foi usada como uma ferramenta para auxiliar no processo de secagem e os autores também não informaram os valores dos parâmetros que englobam a vibração no equipamento (amplitude e frequência).

Pan et al., (2001) realizaram a secagem do leite de soja em leito vibrofluidizado, analisando a influência que a altura do leito, a vazão de alimentação da pasta, a temperatura e a velocidade do ar exerceram no coeficiente volumétrico de transferência de calor. Os autores observaram que o coeficiente tornou-se maior à medida que a vazão de alimentação da pasta e a velocidade do ar aumentaram no processo. Estes resultados mostraram que ao aumentar a quantidade de pasta no interior do leito, aumentou-se o contato do material inerte com a pasta e favoreceu a evaporação da água. Com relação à velocidade do ar, o aumento desta variável favoreceu o aumento das colisões entre o material particulado e, por consequência, facilitou na evaporação da água, aumentando o valor do coeficiente. Porém o aumento da temperatura do ar na entrada do leito resultou na redução dos valores do coeficiente volumétrico de transferência de calor. Para explicar estes resultados os autores comentam que como o calor fornecido pelo fluido era usado para a evaporação de água, ao manter as condições experimentais constantes e variando apenas a temperatura de entrada do ar, a diferença entre as temperaturas de entrada e de saída diminuem e, com isso, a taxa de transferência de calor também diminui, juntamente com o coeficiente volumétrico de transferência de calor.

Diante destes poucos trabalhos existentes na literatura que relatam a secagem ou o comportamento do leito particulado na presença de um material pastoso, fez com que o laboratório do Centro de Secagem do DEQ/UFSCar iniciasse os estudos sobre o processo com

este tipo de matéria prima. Com isso os trabalhos de Daleffe e Freire (2004), Daleffe, Ferreira e Freire (2004), Daleffe, Ferreira e Freire (2005) apresentaram o comportamento fluidodinâmico de diferentes leitos particulados na presença de varias saturações do glicerol, variando a intensidade de agitação ajustada ao equipamento.

Posteriormente, Meili (2009) realizou um estudo sobre a interferência que o adimensional de vibração, referentes a duas combinações da amplitude e da frequência vibracional, a temperatura, a velocidade do fluido e as características de diferentes tipos de pastas, como a água destilada, o lodo de esgoto doméstico, o leite desnatado e três concentrações de carbonato de cálcio, poderiam exercer no comportamento fluidodinâmico e no processo de secagem em leito vidrofuidizado. Os resultados obtidos mostraram que o comportamento fluidodinâmico foi influenciado principalmente pela característica de pasta e pela amplitude. Ou seja, o autor observou que a oscilação de queda de pressão referente ao processo de secagem do lodo de esgoto doméstico apresentou o mesmo comportamento encontrado para os resultados de evaporação de água. Os dados obtidos para o leite desnatado foram os que apresentaram a menor oscilação de queda de pressão do leito, provavelmente devido aos lipídeos e carboidratos que este tipo de leite apresenta. Os resultados do carbonato de cálcio mostraram que o aumento da concentração de sólido na solução diminuiu as oscilações de queda de pressão, devido o aumento das pontes sólidas que fizeram com que o leito particulado ficasse mais coeso. Com relação a agitação implementada no leito, as maiores oscilações de queda de pressão foram obtidas para a combinação que apresentou a maior amplitude.

Quando Meili (2009) analisou a influência destas variáveis no processo de secagem, o mesmo observou que a agitação promoveu uma troca térmica e mássica mais eficiente e o regime permanente foi alcançado mais rapidamente quando comparado ao leito fluidizado convencional. O lodo de esgoto doméstico mostrou que a agitação com maior amplitude aumentou a capacidade evaporativa do leito, uma vez que a umidade relativa encontrou-se em um patamar menor do que obtido para a outra agitação, nas mesmas T, V e vazão de alimentação. Os resultados obtidos para o carbonato de cálcio mostraram que o aumento da concentração de sólido, fez com que o leito entrasse em colapso mais rapidamente e a umidade relativa obtida para a solução com concentração de 9% de sólido foi maior do que os dados encontrados para as concentrações de 3% e 6%, nas mesmas condições experimentais. Com relação aos dados obtidos sobre o leite desnatado, o autor pode concluir que por se tratar de uma pasta muito coesa, sua característica limitou a vazão máxima de alimentação da pasta

no leito fluidizado convencional. Quando a vibração foi submetida no leito, a agitação promoveu um aumento na vazão máxima alimentação de pasta, ampliando a faixa de vazão para se trabalhar no processo de secagem. Além de observar que na maioria dos resultados, as maiores taxas de produção do pó foram obtidas para a maior amplitude de agitação.

Baseado na quantidade de trabalhos presentes na literatura que realizaram a secagem de pasta em leito vibrofluidizado, mostra que ainda existem muitas lacunas que precisam ser esclarecidas e estudadas neste equipamento, tanto com relação ao comportamento fluidodinâmico, quanto com a dinâmica das variáveis que envolvem o processo de secagem.

### **2.3 Forças Interparticulares**

O conjunto de partículas que são usadas no leito vibrofluidizados, tanto secas quanto úmidas, apresentam forças referentes a estas interações as quais influenciam significativamente na dinâmica interparticular e, por consequência, podem interferir no processo de secagem de pasta (SEVILLE 1987). A maioria destas forças é de natureza coesiva, responsáveis por restringir o movimento do material particulado, podendo resultar até no desenvolvimento dos aglomerados que podem surgir durante o processo (FENG; YU, 2000).

Para o leito particulado em que os inertes estão secos, existem as forças eletrostáticas e a força de van der Waals que surgem diante da interação interparticular decorrente apenas do contato entre as partículas e que interfere na fluidodinâmica da mesma dependendo do seu diâmetro. Segundo Balachandran (1987) e Bancelos, Passos e Freire (2007) a força eletrostática surge decorrente das cargas que existem na superfície das partículas proporcionada pelo impacto entre elas, ou, sua interação é consequência da transferência de carga de uma partícula para outra durante a adesão. Este tipo de força apresenta uma magnitude de ordem de  $10^{-5}$ N e são mais significantes em leitos de partículas pequenas, denominadas por partículas finas na literatura.

As forças de van der Waals, segundo Seville, Willet e Knight (2000), refere-se a um termo coletivo das forças que surgem entre as moléculas, dipolo/dipolo, dipolo/não polar e não polar/não polar. De uma forma associativa, esta interação molecular é considerada também para duas partículas que entram em contato uma com a outra. No entanto o que vem a diferenciar uma interação molecular de uma interação interparticular é a relevância da

distância entre os dois corpos, que a equação da força de van der Waals considera para estruturas moleculares e estruturas interparticulares. Pois entre duas partículas, esta distância de separação é menos relevante para a magnitude desta força e por isso a mesma é menos sentida na interação entre partículas grosseiras, quando comparada com a interação molecular.

Yu et al., (2003), ao analisarem as forças de van der Waals em um leito fixo de esferas de vidro, mencionam que esta força passa a ser significativa no leito particulado quando a distância que separa duas partículas é muito menor do que o raio da esfera envolvida. A partir dos resultados obtidos e comparando com dados obtidos na literatura, os autores verificaram que a magnitude da força é influenciada pelo diâmetro do material particulado. Pois quando o diâmetro da partícula envolvida for menor que  $1 \times 10^{-4}$  m, a força de van der Waals prevalece sobre a força da gravidade. À medida que o material particulado apresenta diâmetros superiores a  $1 \times 10^{-4}$  m, a força da gravidade passa a predominar sobre por a força de van der Waals, dominando na interação interparticular do leito.

A partir de muitas evidencias experimentais existentes na literatura, Seville (1987) comenta sobre alguns grupos das partículas definida por Geldart (1973) em relação às forças interparticulares. De acordo com o autor, as partículas pertencentes ao grupo A apresentam uma força interparticular coesiva com magnitude que se encontra entre os grupos C e B, ou seja, uma força de mesma ordem que o peso da partícula. No entanto, quando o material particulado pertence ao grupo D de Geldart, como se tratam de um grupo de partículas muito densas, as forças interparticulares podem ser negligenciadas, uma vez que o peso da partícula irá superar a força interparticular presente.

Em leitos fluidizados existem muitos trabalhos na literatura que estudam a interação das forças interparticulares, variando o tamanho da partícula, o efeito do gás de adsorção, da rugosidade da partícula, entre outros fatores (IYER; DRZAL, 1989; SEVILLE, 1987; SEVILLE; WILLETT; KNIGHT, 2000; VALVERDE; CASTELLANOS; WATSON, 2001; WATSON; VALVERDE; CASTELLANOS, 2001; XIE, 1994). Porém são poucos os trabalhos existentes na literatura que estudaram a interação das forças interparticulares presentes em um leito de partículas com agitação. Jariz, Kiruma e Levenspiel (1992), Marring, Hoffmann e Janssen (1994) e Moreira e Passos (2005), de um modo geral, mostraram que o uso da agitação no sistema promoveu a ruptura das forças interparticulares, principalmente da força de van der Waals, presentes no leito de materiais particulados muito finos e, por consequência, conseguiram apresentar uma fluidização homogênea das partículas.



Porém, dependendo da intensidade de agitação e do material usado, as forças interparticulares não foram rompidas e o leito particulado não apresentou a fluidização desejada.

Outra força que surge como consequência da adição de um líquido ou uma pasta no leito de partículas, originando as pontes líquidas, são suficientes para manter o meio particulado ainda mais coeso e, também, são bastantes relevantes para a análise do processo de secagem de pasta. As forças presentes nestas pontes líquidas são consideradas mais complexas do que a de van der Waals e sua magnitude pode ser alterada conforme a quantidade de líquido livre no interior do sistema particulado e também das propriedades viscosas do mesmo. (FENG; YU, 2000; SEVILLE; WILLET; KNIGHT, 2000; YU et al., 2003).

De um modo geral, estas forças presentes nas pontes líquidas são constituídas pela componente capilaridade e pela componente viscosa. Segundo Yu, et al., (2003), a componente capilaridade corresponde a soma da tensão superficial com a pressão hidrostática sobre a ponte líquida gerada. A componente viscosa já surge a partir do escoamento do líquido na ponte criada. No entanto, esta última componente só é significativa quando a viscosidade do líquido adicionado no sistema é alta ou quando as partículas envolvidas se aproximam, uma da outra, a alta velocidade. Os mesmos autores mencionam que em um leito constituído de partículas grosseiras (maiores que 0,001m) quando é adicionado o líquido no sistema, a componente viscosa deixa de ser significativa, quando comparada com a componente capilaridade, podendo então ser negligenciada da análise do processo.

Feng e Yu (2000) relacionaram as forças interparticulares existentes em um leito fixo, constituído de esferas de vidro, com a porosidade deste leito à medida que variou a quantidades de água inserida do mesmo. Os autores verificaram que independente do diâmetro das esferas de vidro, ao aumentar a quantidade de água no sistema, a porosidade do leito também aumentou até chegar o instante em que esta se manteve constante. Passos e Mujumdar (2000) ao estudarem o efeito das forças coesivas no interior do leito de esferas de vidro com o diâmetro de 0,003m, na presença de diferentes concentrações do glicerol, em um leito fluidizado, observaram o mesmo comportamento citado por Feng e Yu (2000). A porosidade do leito de esferas de vidro aumentou quando a concentração do glicerol também aumentou até uma concentração de 0,003. De acordo com os autores, o aumento da concentração do glicerol aumentou a resistência do ar para escoar no leito, devido a redução da porosidade do leito particulado. Ao analisarem os gráficos de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar, observaram que na região de leito fixo, à medida que

adicionou o glicerol no sistema de partículas, as curvas tiveram um comportamento mais linear e, de acordo com a equação de Ergun, este comportamento mostra que a componente viscosa é a que predomina no comportamento fluidodinâmico em relação a componente inercial.

Na grande maioria dos trabalhos existentes na literatura, sobre a análise do comportamento dinâmico do leito de partículas úmidas em leito fluidizado, pode-se observar que a adição do líquido no meio particulado, promoveu a mudança do comportamento dinâmico do leito. Ou seja, o aumento da quantidade de pasta no interior do leito promoveu um aumento das pontes líquidas no sistema e, por consequência, possibilitou que fosse desenvolvida uma estrutura do leito particulado aparentemente mais estável, diminuindo assim a expansão do leito particulado no processo de fluidização. Por consequência, o aumento da quantidade de líquido promoveu o aumento da velocidade de mínima fluidização, uma vez que o fluido necessita de uma força maior para promover a fluidização do sistema e, também, promoveu o aumento da porosidade do leito particulado (MARONGLOU; NIENOW, 1985; MCLAUGHLIN; RHODES, 2001; PASSOS; MUJUMDAR, 2000; SEVILLE; CLIFT, 1984; TARDOS et al., 1985).

Esta mudança de comportamento dinâmico do leito particulado devido as pontes líquidas desenvolvida faz com que uma partícula pertencente a determinado grupo de Geldart (1987), quando seca, se assemelhe a outro grupo quando úmida. Seville e Clift (1984) observaram que ao adicionarem um óleo não volátil a um leito particulado de esferas de vidro pertencente ao grupo B de Geldart, as partículas apresentaram uma fluidização característica pertencente ao grupo A ou C de Geldart, dependendo da proporção de óleo do meio particulado. Passos e Mujumdar (2000) ao analisarem o comportamento de um conjunto de esferas de vidro pertencentes ao grupo D de Geldart, diante de diferentes quantidades de glicerol, verificaram que o sistema passou a apresentar características semelhantes as partículas pertencentes ao grupo B. McLaughlin e Rhodes (2001) analisaram o comportamento fluidodinâmico de leito particulado constituído de um material inerte e não poroso que pertence ao grupo B de Geldart, diante de diferentes concentrações e viscosidades de um líquido com densidade de  $2594\text{Kg/m}^3$ . Conforme os resultados obtidos pelos autores, observou-se que dependendo da concentração do líquido presente no leito do material inerte, um mesmo material pode ter um comportamento pertencente ao grupo A ou ao grupo C de Geldart.

Ao adicionar pasta no meio particulado durante o processo de secagem de pasta com o auxílio de um material inerte, aumenta-se ainda mais a complexidade da operação, devido a presença destas forças interparticulares no sistema particulado. Logo, para promover a descrição fenomenológica deste processo em um leito vibrofluidizado, muito ainda precisa ser pesquisado, uma vez que muitas lacunas ainda existem na literatura sobre este assunto. Mediante a isso, que no tópico a seguir será apresentada uma abordagem alternativa que pode auxiliar na descrição do processo, mesmo na falta de algumas dessas informações.

#### **2.4 Modelagem do processo de secagem de pasta em leito vibrofluidizado.**

Ao observar os trabalhos presentes na literatura sobre o leito vibrofluidizado, verificou-se que existem pesquisas que desenvolveram a descrição matemática do processo de secagem de grãos diante do escoamento de ar e da agitação implementada ao equipamento. O mesmo não pode ser dito para o processo de secagem de pasta com auxílio de materiais inertes, pois são poucos os trabalhos que realizaram, neste equipamento, estudos com o objetivo de verificar como as diferentes intensidades de agitação exercidas pelo equipamento podem interferir no processo de secagem. Como o estudo de modelagem e simulação do processo é importante para a análise do desenvolvimento de projetos de novos secadores, uma vez que a partir das equações fenomenológicas obtidas é possível antecipar comportamentos do processo, úteis para o seu funcionamento.

A partir dos resultados obtidos por Meili (2009), pode-se verificar que agitação proporcionada pelo equipamento durante os experimentos de secagem de diferentes pastas mostraram que o leito vibrofluidizado apresenta um comportamento característico próximo a de um tanque perfeitamente agitado, desde que a amplitude e a frequência sejam escolhidas adequadamente para a operação do mesmo. Perante esta consideração observada no trabalho do autor, o processo de secagem de pasta neste equipamento, pode ser descrito usando uma metodologia mais simplificada para reproduzir os fenômenos de transferência de calor e massa do processo, que corresponde ao modelo de parâmetros concentrados.

Este modelo fundamenta-se em balanços macroscópicos de transferência de calor e massa para as três fases, gás, sólida e líquida, que englobam a secagem de pasta com material inerte. Para obter a resolução destas equações que represente o comportamento do processo em leito vibrofluidizado, levam-se em consideração algumas hipóteses que foram usadas para

o desenvolvimento das equações que descrevam os fenômenos de transferência de calor e massa que envolvem o processo de secagem de pasta em leito de jorro, conforme são apresentadas a seguir (ALMEIDA, 2009):

- i. o leito vibrofluidizado comporta-se como um tanque perfeitamente agitado;
- ii. a mistura gasosa é considerada como um gás ideal;
- iii. o temperatura do sólido na saída é igual á temperatura do gás de exaustão;
- iv. o efeito da difusão da água no interior do filme formado na superfície do material inerte é desprezível, e
- v. o acúmulo de pasta no interior do leito não é significativo.

A partir destas hipóteses, o comportamento da umidade das fases gasosa e líquida foram calculadas baseadas nos balanços globais de conservação de massa, de acordo com as equações a seguir encontradas:

$$\frac{dy_0}{dt} = \frac{(W_i y_i - W_0 y_0 + k)}{m_g} \quad (3)$$

$$x_0 = \frac{F_i x_i - k}{F_0} \quad (4)$$

Onde  $y_0$  corresponde a fração mássica do vapor de água na saída do leito vibrofluidizado,  $t$  o tempo,  $m_g$  a massa de gás,  $W_i$  é a vazão mássica do gás na entrada do leito vibrofluidizado,  $y_i$  é a fração mássica de vapor de água na entrada do leito vibrofluidizado,  $W_0$  é a vazão mássica de saída do leito vibrofluidizado,  $k$  o termo de acoplamento,  $x_0$  fração de água líquida na saída,  $x_i$  é a fração de água líquida na entrada do leito vibrofluidizado,  $F_i$  a vazão mássica de pasta na entrada do leito vibrofluidizado e  $F_0$  é a vazão mássica da pasta na saída do leito.

O comportamento da variável temperatura do gás de exaustão foi calculado através do balanço global de conservação de energia:

$$\frac{dT_{g0}}{dt} = \frac{W_i C_{Pgi} T_{gi} + F_i C_{Ppi} T_{pi} - W_0 C_{Pg0} T_{g0} - F_0 C_{Pp0} T_{g0} - \lambda k - q}{m_g C_{Pg0} + m_s C_{Ps} + m_v C_{Pv}} \quad (5)$$

Em que  $T_{g0}$  corresponde a temperatura do gás na saída do leito vibrofluidizado,  $C_{Pgi}$  o calor específico do gás na entrada do leito vibrofluidizado,  $T_{gi}$  a temperatura do gás na entrada do leito vibrofluidizado,  $C_{Ppi}$  o calor específico da pasta na entrada do leito vibrofluidizado,  $T_{pi}$  a temperatura de pasta na entrada da câmara de secagem do leito vibrofluidizado,  $C_{Pg0}$  o calor

específico do gás na saída do leite vibrofluidizado,  $\lambda$  o calor latente de vaporização,  $q$  o calor perdido pelas paredes do leite vibrofluidizado,  $m_s$  a massa das partículas inertes,  $m_v$  a massa do leite vibrofluidizado e  $C_{p_v}$  o calor específico do leite vibrofluidizado.

Como foi observado as equações 3, 4 e 5 apresentam a letra  $k$ , variável que engloba os fenômenos simultâneos de evaporação de água e a cinética de recobrimento do material inerte envolvido no processo de secagem de pasta. Este termo foi representado como uma equação exponencial, conforme determinado por Almeida (2009) e apresentado na equação 6:

$$k = a(1 - e^{bt}) \quad (6)$$

Em que  $a$  e  $b$  são constantes ajustáveis da equação.

Nascimento (2013) também realizou a simulação dos dados de secagem em leite de jorro para diferentes tipos de leite, usando a mesma metodologia determinada por Almeida (2009). No entanto para determinar o termo de acoplamento e as constantes presentes na equação 6, o autor usou uma metodologia empírica, a rede neural artificial. Posteriormente esta rede neural foi acoplada ao modelo fenomenológico, originando então um modelo híbrido, ou também conhecido como modelo caixa cinza, denominados de modelo híbrido CST/Neural.

Usar uma metodologia empírica para determinar parâmetros ou comportamento dinâmico de variáveis que envolvem o processo de secagem, tem se mostrado bastante promissora, uma vez que na literatura foi observada a eficácia do uso desta metodologia, principalmente a rede neural artificial, para esta finalidade. A seguir, serão apresentados nos quadros 2.3 e 2.4, alguns trabalhos que utilizaram da abordagem empírica, tanto para descrever o processo de secagem, como para auxiliar no desenvolvimento fenomenológico do processo, em diferentes processos de secagem e matérias primas através da rede neural artificial, especialmente os trabalhos que foram realizados no laboratório do Centro de secagem de pasta e sementes do DEQ/UFSCar.

Quadro 2.3: Estudos que usaram a rede neural como ferramenta para auxiliar na descrição de processos

Referência	Processo	Resultados significantes
Ciesielski e Zbicinski (2001)	Secagem de dois tipos de sílica gel em leito fluidizado convencional	Os autores construíram o modelo híbrido para descrever o processo de secagem, em que a rede neural foi construída para obter como resposta o Nu, indiretamente o coeficiente de transferência de calor. Esta rede neural foi acoplada a um modelo matemático determinado por Strumillo et al., (1991) para originar então o modelo híbrido. Em seguida, o modelo híbrido construído foi comparado com outras metodologias, como modelos empíricos e fenomenológicos. Diante dos resultados encontrados, foi verificado que o modelo híbrido mostrou ser uma metodologia muito vantajosa, pois aumentou a precisão dos dados simulados e diminuiu o custo para a elaboração do modelo.
Castellanos et al., (2002)	Secagem de um sólido úmido, alpejuro, em fluidizado	A rede neural foi usada para determinar a umidade em função do tempo de um sólido úmido, durante o processo de secagem em leito fluidizado. Os resultados obtidos mostraram-se bem satisfatórios, pois o erro do modelo foi na mesma ordem do erro experimental, $\pm 1\%$ .
Cubillos e Reyes (2003)	Secagem de cenouras em leito fluidizados	A rede neural foi construída para descrever a variação da umidade da cenoura, cortada em cubos, variando a temperatura e a velocidade do ar durante o processo de secagem. Os resultados obtidos pela rede mostram-se satisfatórios, uma vez que corresponde a uma estrutura que engloba todas as condições experimentais.
Erenturk e Erenturk (2007)	Secagem de fatias de cenouras em secador bandejas com fluxo paralelo as fatias.	A rede neural foi usada para determinar a variação da umidade em função do tempo para diferentes condições de temperatura, velocidade do ar e espessuras das fatias. Os resultados obtidos mostraram que a rede construída teve muito sucesso para prever a dinâmica da umidade em função do tempo, além de mostrar que obteve os melhores resultados quando comparados com as diferentes correlações empíricas usadas, apresentando uma precisão em torno de 0,05%.
Youssefi et al., (2009)	Secagem do suco de romã em leito spray-drier	Os resultados obtidos pela rede neural foram comparados com os obtidos pela superfície de resposta e mostraram que a rede neural foi a metodologia que apresentou melhor precisão dos resultados preditos, pois os erros absolutos médio, o $R^2$ e o erro quadrado médio foram menores em comparação a superfície de resposta. Além da rede se ajustar com maior precisão aos dados experimentais.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante do que foi apresentado nos quadros, verificou-se que o uso da metodologia empírica, mas precisamente a rede neural tem se mostrado altamente eficientes para descrever totalmente o processo de secagem, independente do equipamento usado para desenvolver a operação. Estes resultados da rede neural são obtidos devido a grande quantidade de parâmetros ajustados pela mesma para que os resultados preditos sejam os mais semelhantes aos dados experimentais e, por consequência, apresenta bons ajustes. Porém deixam de apresentar significados físicos.

Quadro 2.4: Continuação do Quadro 2.3.

Referência	Processo	Resultados significantes
Cubillos et al., (2011)	Secagem de farinha de peixe em leito rotativo	A rede neural foi desenvolvida para estimar a taxa de secagem e o coeficiente de transferência de calor volumétrico. Em seguida esta rede foi acoplada as equações obtidas a partir dos balanços de massa e energia em um secador rotativo. O modelo híbrido foi construído como uma ferramenta para controle preditivo e mostrou-se ser mais fácil de implementar em um sistema quando comparado com as equações puramente fenomenológicas. Além de reduzir a produção de erros do modelo, quando comparou-se os parâmetros encontrados por métodos semi-empíricos com os parâmetros encontrados pela RNA.
Nascimento, Freire e Freire (2013)	Secagem de leite integral, desnatado, semi-desnatado e sem lactose no leito de jorro convencional	Uma rede neural foi usada para determinar o parâmetro presente no modelo CST, sendo posteriormente acoplada do modelo fenomenológico para gerar o modelo híbrido. Outra rede foi usada para determinar o comportamento hidrodinâmico. Os resultados mostraram que, a rede neural construída para o comportamento hidrodinâmico apresentou boa concordância com os dados experimentais. A rede neural acoplada ao modelo CST também apresentou boa concordância nos valores de k, para posteriormente determinar a dinâmica da temperatura de saída do leito e das umidades relativas, absolutas e do sólido.
Costa et al., (2014)	Secagem de folha de hortelã em um secador convectivo com escoamento horizontal	Os resultados mostraram que, mesmo a folha de hortelã sendo uma partícula bem heterogênea, uma única rede neural foi suficiente para interpolar satisfatoriamente os dados experimentais de variação de umidade em função do tempo com os dados obtidos pela rede.
Costa et al., (2015)	Secagem de leite desnatado, lodo de esgoto doméstico e três concentrações do carbonato de cálcio em leito vibrofluidizado	A rede neural foi usada para determinar o termo de acoplamento, presente nas equações obtidas através do modelo CST. Posteriormente esta rede foi acoplada aos modelos obtidos pelos balanços globais de massa e energia em um leito vibrofluidizado para gerar o modelo híbrido. Os resultados obtidos mostraram que a rede usada apresentou boa concordância para determinar os dados de k e, consequentemente descrever a dinâmica das variáveis, temperatura da saída do leito e das umidades, relativa, absoluta e do pó produzido, para todos os tipos de pastas.
Estiatia et al., (2016)	Biomassa gerada de combustão de diferentes tipos de resíduos	A rede neural foi usada para determinar os maiores valores do aquecimento da biomassa. Mesmo a rede apresentando um ajuste de dados razoável, em comparação com outra metodologia empírica, é a metodologia que apresenta de um modo geral o melhor desempenho, uma vez que simplifica a tarefa de ajustar os dados experimentais em uma única estrutura.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por decorrência desta falta de significados físicos dos modelos empíricos, que alguns autores começaram a utilizar os modelos híbridos, ou modelos caixa cinza, para descrever o processo de secagem, conforme foi verificado nos quadros. Muitos autores usam esta metodologia para determinar parâmetros presentes nas equações fenomenológicas que são difíceis de determinar experimentalmente. Desta forma, esta metodologia consegue reduzir o número de parâmetros empíricos dos modelos caixa preta e trazem significados físicos aos

fenômenos envolvidos no processo em que pretende-se descrever. Além de reduzirem o tempo de desenvolvimento da simulação, pois alguns destes modelos demoram horas para apresentarem soluções obtidas pelas equações desenvolvidas.

Visto o sucesso encontrado no modelo híbrido CST/Rede Neural para descrever os fenômenos envolvidos no processo de secagem e ainda mantendo as características físicas das equações, que pretende-se desenvolver um modelo CST, com uma rede neural acoplada, para descrever os processo envolvido na secagem de pasta em leito vibrofluidizado.

## **2.5 Considerações Finais**

Conforme foi mostrado na revisão bibliográfica, verificou-se que o comportamento fluidodinâmico do leito vibrofluidizado foi o ponto mais estudado pela maioria dos trabalhos existentes na literatura e, diante disso, pode-se constatar que a dinâmica deste equipamento é influenciada pelas características físicas do material particulado, altura do leito de partículas e intensidade de agitação implementada ao mesmo. Porém Daleffe (2005) ao focar seus estudos em investigar unicamente a influência que a agitação exerceu no comportamento fluidodinâmico deste leito móvel, diante de materiais inertes com diferentes características físicas e também quando o mesmo era constituído com diferentes graus de saturação do glicerol, o autor pode constatar que diferentes comportamentos fluidodinâmicos foram observados para um mesmo número adimensional de vibração. Além disso verificou que o grau de saturação do glicerol influenciou nos valores de queda de pressão e da velocidade de mínima fluidização.

Com relação à secagem de pasta com auxílio do material inerte no leito vibrofluidizado, como corresponde a um processo com grande complexidade, uma vez que envolve os fenômenos de transferência de calor e massa, juntamente, com as interferências ocasionadas pelos parâmetros operacionais que caracterizam o equipamento, ainda corresponde a um tema pouco encontrado na literatura. Das poucas pesquisas que realizaram a secagem de pasta neste equipamento, a maioria dos estudos analisaram a influência das características físicas do material inerte, altura do leito particulado e parâmetros como temperatura, vazão de alimentação e velocidade do fluido podem exercer no processo de secagem em um leito com agitação.



Diante da falta de informações existentes na literatura sobre a secagem de pasta em leite vibrofluidizado e, também, por conta dos resultados encontrados por Daleffe (2005), que Meili (2009) sentiu a necessidade de investigar a influência que a agitação implementada no equipamento exerceu durante a secagem de pasta com auxílio de partículas inertes. Para isso o autor utilizou três tipos de pastas, cada uma com características e composição de sólidos diferentes, e um número adimensional de vibração com duas combinações de amplitude e frequência. A partir de seus resultados, pode-se confirmar que o número adimensional de vibração não poderia ser utilizado como um parâmetro universal. Pois o comportamento fluidodinâmico das esferas de vidro influenciou de maneira significativa nos fenômenos de transferência de calor e massa, mostrando que dependendo da característica da pasta, a agitação com alta amplitude e baixa frequência, promoveu um aumento da capacidade evaporativa do mesmo durante o processo. A partir destes resultados o autor desmitificou o caráter universal que o número adimensional de vibração apresentava na literatura.

Conforme foi observado neste capítulo, pode-se constatar que ainda há uma necessidade em realizar um estudo mais amplo da secagem de pasta em leite vibrofluidizado, quando o mesmo é exposto a diferentes intensidades de agitação, duas amplitudes combinadas a diferentes frequências, a fim de verificar a influência que cada parâmetro vibracional pode exercer sobre esta operação. Além de possibilitar a obtenção de informações primordiais sobre este leite móvel quanto a sua fluidodinâmica, para maior análise e compreensão do processo de secagem de pasta neste equipamento.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados a unidade experimental, os materiais inertes, as pastas e as metodologias empregadas para o desenvolvimento dos ensaios experimentais sobre o comportamento fluidodinâmico, a evaporação de água e a secagem de pastas que foram realizados no leito vibrofluidizado, bem como as características do equipamento e as condições selecionadas de cada experimento.

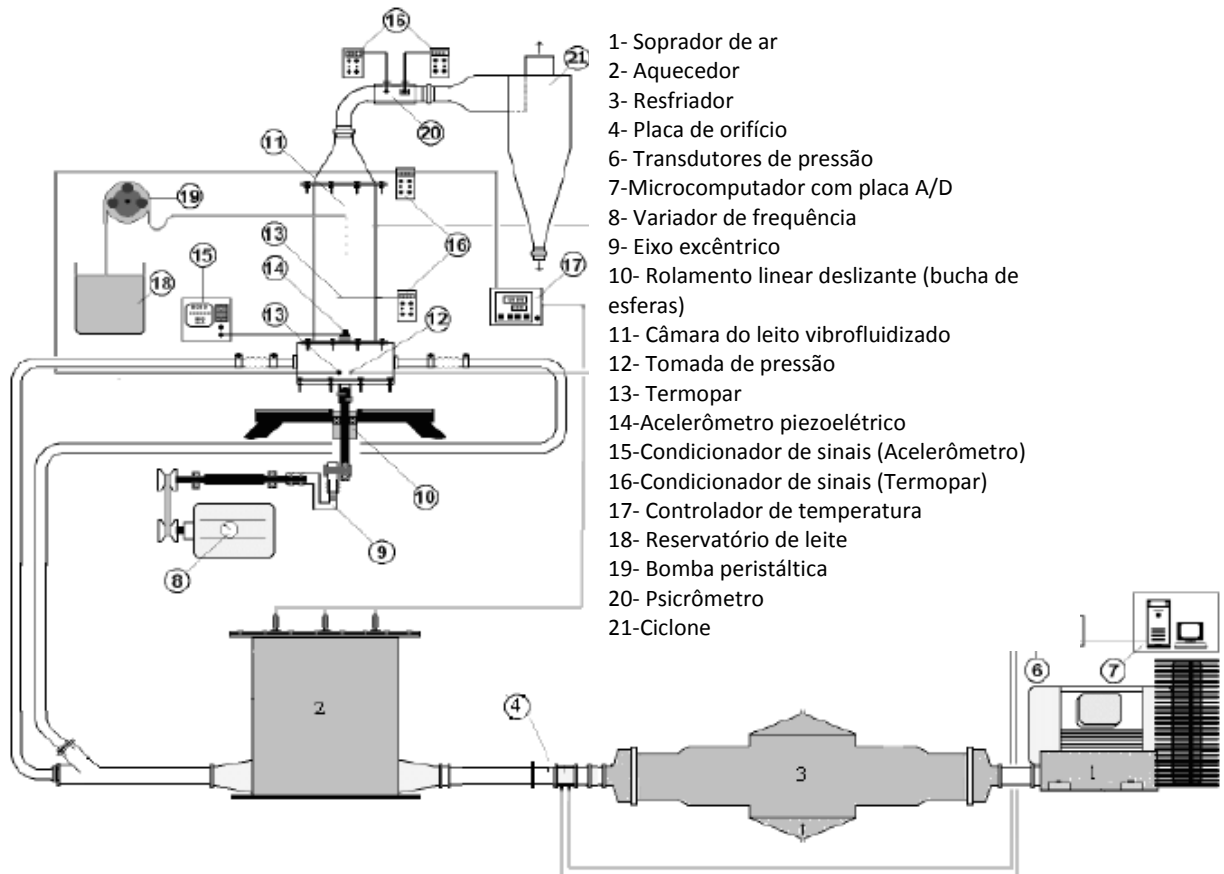
#### **3.1 Unidade Experimental.**

A unidade experimental que foi usada neste trabalho, foi construída e instalada no laboratório do Centro de Secagem de Pastas e Sementes do DEQ/UFSCar, conforme o esquema apresentado na figura 3.1.

O secador foi constituído por uma câmara de vidro com seção circular de 0,114m de diâmetro e 0,5m de altura. O ar fornecido ao equipamento era realizado por um soprador da marca IBRAM com potência de 7,5 cv e sua vazão controlada por meio de uma placa de orifício previamente calibrada, conectados a transdutores de pressão da marca Autotran Incorp. A inserção de ar na câmara de secagem era realizada mediante duas entradas que se encontram a abaixo da placa distribuidora, por injeção contracorrente de ar com o objetivo de homogeneizá-lo. A base do leito também era conectada aos transdutores para obter a tomada de pressão na câmara de secagem. Para manter a temperatura do ar constante, os termopares eram ligados a um aquecedor com resistências elétricas, conectado a um controlador de temperatura da marca Flyever FE50RP. A vibração impostas durante o processo era realizado por uma haste que liga a câmara de secagem a um mecanismo excêntrico, responsável em converter o movimento rotacional do motor em um movimento senoidal vertical no leito. A amplitude era ajustada no eixo excêntrico e a frequência vibracional

determinada através de um variador de velocidade presente no motor, verificada por um tacômetro óptico Minipa MDT- 2244A.

Figura 3.1: Unidade experimental.



Fonte: MEILI (2009).

As tomadas de pressão obtidas na placa de orifício e as temperaturas medidas nos termopares eram captadas durante o processo de secagem e enviados ao sistema de aquisição de dados, desenvolvido em linguagem gráfica (G) do Labview, utilizando uma placa de aquisição da National Instruments, instalada em um microcomputador. Estes dados eram coletados e tratados pela placa de aquisição dentro de um intervalo de tempo pré-estabelecido, 1024 pontos a cada 30 segundos, que fornecia a média aritmética e desvio padrão destes dados em um arquivo.txt. Uma descrição mais detalhada desta unidade experimental pode ser encontrada no trabalho de Meili (2009).

### 3.2 Material particulado e Pastas

Para a condução dos experimentos foram utilizadas esferas de vidro, como material inerte, com os seguintes diâmetros: 0,00119m, 0,00219m e 0,00319m, e densidade real de 2500Kg/m<sup>3</sup>. O diâmetro médio das partículas foi determinado através de uma análise granulométrica, com o auxílio de um conjunto de peneiras padronizadas para obter uma faixa granulométrica das partículas que ficaram retidas entre as mesmas. Com o auxílio da equação 7, que refere-se ao diâmetro médio de Sauter, o diâmetro médio foi obtido:

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum_i \left( \frac{\Delta X}{D_m} \right)_i} \quad (7)$$

onde X corresponde a fração mássica das partículas retida na peneira.

Como pastas foram usadas a água destilada, considerada como uma pasta ideal, e o leite desnatado da marca Argenzio®, oriunda do interior do estado de São Paulo, e obtido no comércio local. Sua composição básica foi obtida segunda a Tabela Brasileira de composição de Alimentos fornecida pelo site da USP e mostradas na tabela 1. Além de apresentar densidade igual a 1032,83 kg/m<sup>3</sup> e concentração de sólidos de 8,9% (MEILI, 2009).

Tabela 1: Composição geral do leite desnatado

Parâmetros	Composição centesimal (valor por 100 g)
Conteúdo de água(g)	91,24
Energia(Kcal)	35
Proteína (g)	3,26
Lipídeos totais (g)	0,44
Carboidratos totais – por diferença (g)	4,40
Carboidratos Disponíveis – por diferença (g)	4,40
Cinzas (g)	0,66

Fonte: Adaptado da Tabela Brasileira de composição de Alimentos.

Esta pasta foi selecionada devido as suas características coesivas, que dificultam a fluidização do inerte durante o processo, e também pelas observações encontradas por autores como Meili (2009) e Nascimento (2013).

### **3.3 Procedimento Experimental.**

Após apresentar a unidade experimental empregada neste trabalho, os diferentes materiais inertes e as duas pastas que foram utilizadas nos ensaios experimentais, nos subitens a seguir serão descritos detalhadamente os procedimentos realizados para a obtenção da caracterização fluidodinâmica, do processo de evaporação de água e de secagem do leite desnatado.

#### **3.3.1 Obtenção da curva fluidodinâmica**

A caracterização do comportamento fluidodinâmico do leito vibrofluizado foi realizada a fim de analisar a influência que o diâmetro do leito particulado e a intensidade de agitação exercem na dinâmica do equipamento. Para isso foram usadas esferas de vidro com os seguintes diâmetros médios, 0,00119m, 0,00219m e 0,00319m, e diferentes intensidades de agitação, que corresponderam as combinações de duas amplitudes com várias frequências vibracionais.

No entanto, antes que fosse iniciado qualquer ensaio fluidodinâmico, primeiramente, foram realizados alguns testes preliminares para a escolha das condições adequadas para o desenvolvimento dos mesmos, em que as amplitudes, combinadas com a faixa operacional da frequência vibracional, não promovessem qualquer dano estrutural ao equipamento, ou que prejudicasse a leitura das variáveis envolvidas no processo. Ao final destes testes, as condições operacionais selecionadas para elaboração dos experimentos são apresentadas na tabela 2.

Desta forma, definido as condições experimentais, os ensaios fluidodinâmicos foram conduzidos adicionando a câmara de secagem uma massa desse material inerte de 1,5kg, que correspondia, equivalentemente, a uma altura de 0,09 m de esferas de vidro. Em seguida foi ajustada uma condição vibracional no leito vibrofluidizado, conforme as combinações apresentadas na tabela 2. Posteriormente, aguardava-se que o regime permanente fosse alcançado no sistema, diante da expansão completa da camada de partículas. Em seguida, a velocidade superficial do ar ( $U_s$ ) era reduzida e a queda de pressão medida, simultaneamente. O processo se repetiu até a velocidade do ar chegar a um valor igual a zero, metodologia

clássica de Bratu e Jinescu (1971). Esta metodologia foi refeita para todas as condições vibracionais presentes na tabela 2 e para os três diâmetros de esfera de vidro apresentadas no início deste subitem.

**Tabela 2: Condições experimentais fluidodinâmicas.**

Amplitude (m)	Frequência (RPM)	Adimensional de vibração ( $\Gamma$ )
0,003	100	0,148
0,003	200	0,245
0,003	300	0,445
0,003	400	0,53
0,003	500	0,83
0,003	600	1,21
0,003	700	1,65
0,003	800	2,15
0,003	900	2,7
0,003	1000	3,36
0,003	1100	4,06
0,015	100	0,148
0,015	200	0,65
0,015	300	1,48
0,015	400	2,69
0,015	500	4,2
0,015	600	6,04

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos ensaios realizados, foram construídas as curvas da queda de pressão e desvio padrão de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar. Como nestes gráficos, não ficava evidente a velocidade em que ocorreu a transição da região de leito fixo para a região de fluidização do material particulado e também como não existe uma metodologia específica para determinar esta variável em leito com agitação, a velocidade de mínima fluidização foi estabelecida utilizando a metodologia clássica empregada em leitos fluidizados convencionais, que consiste na inserção de duas retas tangentes à curva característica, uma próxima a região do leito fixo e a outra na região de fluidização das partículas.

### 3.3.2 Testes de Evaporação de água e secagem de leite desnatado

Antes que fossem desenvolvidos qualquer ensaio de secagem do leite desnatado, foram efetuados alguns testes de evaporação de água e também de secagem do leite desnatado no leito vibrofluidizado. Estes experimentos foram conduzidos com a finalidade de determinar o diâmetro de esfera de vidro a ser trabalhada, tanto no processo de evaporação de água como no processo de secagem de pasta, e também para selecionar as condições experimentais a serem utilizadas na secagem do leite desnatado.

Para o desenvolvimento destes testes experimentais, os ensaios foram divididos em duas etapas. Na primeira etapa foram realizados alguns ensaios de evaporação de água variando o diâmetro da esfera de vidro, com o intuito de analisar a influência que o diâmetro do material inerte pode exercer neste processo. Desta forma foi inserido no leito vibrofluidizado 1,5kg de esfera de vidro. Em seguida, ajustou-se uma condição aleatória para o desenvolvimento dos testes, que correspondeu a  $T=100^{\circ}\text{C}$ , vazão do ar de  $1,25\text{m}^3/\text{min}$ , vazão de água destilada de  $18\text{mL}/\text{min}$  e  $\Gamma=0,65$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $200\text{RPM}$ ). Foi utilizado unicamente esta intensidade de agitação, com o intuito de verificar somente a influência dos fenômenos de transferência de calor e massa durante o processo de secagem de pasta. Com os valores pré-estabelecidos de vibração, temperatura e vazão do ar, realizou-se o ajuste destas condições no equipamento e aguardou-se que o regime permanente fosse atingido. Quando não houve mais a variação da temperatura e vazão do ar com o tempo dentro da câmara de secagem, iniciou-se a alimentação de água destilada e realizou-se o monitoramento dos valores de temperatura de bulbo seco, umidades relativa e absoluta do ar na saída do leito em função do tempo, até que um novo regime permanente fosse alcançado no sistema. Em seguida, encerrava-se o experimento e trocava-se o diâmetro do material particulado a ser inserido dentro do leito vibrofluidizado, para o desenvolvimento de um novo teste. Este processo foi realizado para as três esferas de vidro usadas neste trabalho.

Com os dados experimentais obtidos nestes testes, construiu-se as curvas de umidade relativa e absoluta em função do tempo e verificou-se qual esfera de vidro que apresentou os melhores resultados diante da evaporação de água, que correspondeu aos maiores patamares obtidos nas duas umidades. Posteriormente, realizou-se um teste de secagem do leite desnatado no leito vibrofluidizado, para as mesmas condições de intensidade de vibração, temperatura e vazão do ar usadas no processo de evaporação da água, a fim de confirmar se

este material inerte não iria favorecer o processo de aglomeração durante a secagem da pasta. O procedimento para o desenvolvimento do teste foram semelhantes ao apresentado no parágrafo anterior para a evaporação de água, mudando unicamente que ao invés de água destilada, o equipamento foi alimentado com o leite desnatado.

Assim que determinou-se o diâmetro da esfera de vidro a ser utilizada, correspondendo a esfera de 0,00319m, iniciou-se então a segunda etapa de experimentos, onde foram realizadas apenas a evaporação de água variando os valores de temperatura e velocidade do ar no sistema. As temperaturas do ar usadas foram 80°C e 100°C, que foram combinadas com três velocidades superficiais do ar, 20%, 30% e 40% acima da velocidade de mínima fluidização, que correspondem às vazões de 1,07m<sup>3</sup>/min, 1,17m<sup>3</sup>/min e 1,25m<sup>3</sup>/min respectivamente. Como o objetivo principal destes experimentos eram analisar a influência da temperatura e velocidade do ar na evaporação de água, em todos os ensaios a vibração implementada no leito foi a mesma e seu valor foi semelhante ao usado na primeira etapa,  $\Gamma = 0,65$  ( $A = 0,015\text{m}$  e  $f = 200\text{RPM}$ ).

Na realização dos ensaios de evaporação de água, primeiramente 1,5kg da esfera de vidro selecionada era adicionada ao leito vibrofluidizado e, posteriormente, a intensidade de agitação, a temperatura e a velocidade do ar eram ajustados no equipamento. Assim que o regime permanente era atingido no sistema, iniciava-se a alimentação de água destilada na câmara de secagem a uma vazão de 14mL/min. A partir do momento que a água era inserida no leito, era realizado um monitoramento online dos valores de temperatura, umidade relativa e absoluta do ar na saída do leito em função do tempo de processo, por um sistema de aquisição de dados, até que um novo valor constante fosse encontrado pelas variáveis mencionadas. Depois que estas variáveis não oscilavam mais com o tempo, encerravam-se os experimentos e preparava-se o equipamento para o ensaio posterior, em que a vazão de alimentação era 4mL acima da vazão anterior. Este procedimento foi repetido até alcançar a saturação máxima do ar na saída do leito, correspondente as condições experimentais ajustadas ao equipamento.

Quando o sistema alcançava a saturação máxima do ar, desligava-se o leito vibrofluidizado, ajustava-se a nova condição de temperatura e velocidade do ar ao mesmo e repetia-se todo este procedimento descrito anteriormente para as novas condições do sistema. Desta forma, este processo foi repetido para todas as condições de temperatura e velocidade do ar mencionadas previamente.



Ao final de cada experimento foram construídos os gráficos que mostraram as curvas de temperatura do ar na saída do leito, umidade relativa e umidade absoluta em função do tempo, durante o processo de evaporação de água no leito vibrofluidizado.

### 3.3.3 Secagem de pasta

Os experimentos foram desenvolvidos com o objetivo de analisar a influência que as diferentes intensidades de agitação implementadas no leito vibrofluidizado podem exercer no processo de secagem de pasta com auxílio de partículas inertes. Para isso, após a realização dos testes, selecionou-se usar a esfera de vidro com diâmetro de 0,00319m, temperatura do ar igual a 100°C e velocidade do fluido 20% acima da velocidade de mínima fluidização. Optou-se em trabalhar com estas grandezas nos ensaios experimentais, uma vez que visava-se obter a maior capacidade evaporativa do equipamento durante o processo de secagem e, também, que a interferência do ar fosse mínima durante o mesmo, existindo mais a influência da vibração no sistema estudado.

**Tabela 3: Condições experimentais de secagem**

Amplitude (m)	Frequência (RPM)	Adimensional de vibração ( $\Gamma$ )
0,003	400	0,53
0,003	500	0,86
0,003	600	1,21
0,003	700	1,65
0,003	800	2,15
0,003	900	2,7
0,003	1000	3,36
0,003	1100	4,06
0,015	100	0,148
0,015	200	0,65
0,015	300	1,48
0,015	400	2,69
0,015	500	4,2
0,015	600	6,04

Fonte: Elaborado pelo autor.

As condições vibracionais utilizadas no equipamento são apresentadas na tabela 3. Deve-se deixar claro que estas condições mostradas correspondem as intensidades de agitação

em que não houve o colapso do leito particulado durante a secagem do leite desnatado no leito vibrofluidizado, ou seja, não ocorreu a desfluidização das esferas de vidro durante o processo.

Desta forma, os ensaios foram elaborados da seguinte maneira, adicionava-se a câmara de secagem 1,5kg da esfera de vidro e, em seguida, ajustavam-se as condições operacionais: temperatura do ar de entrada, velocidade do fluido, amplitude e frequência vibracional. Assim que o regime permanente era atingido no sistema, iniciava-se a alimentação do leite desnatado com uma vazão de 14mL/min. O monitoramento on-line das variáveis umidade relativa, umidade absoluta, temperatura de bulbo seco e queda de pressão no leito eram realizados pelo sistema de aquisição de dados, por um período de 30 minutos. Posteriormente, o material inerte era retirado da câmara de secagem e, então, efetuava-se a limpeza tanto do inerte quanto da câmara, para que não existissem vestígios da secagem realizada no experimento subsequente. O ciclone também era removido da unidade experimental e lavado, uma vez que foi observado o acúmulo de pó na saída do “underflow”. Após a limpeza do equipamento, outro experimento então era iniciado com uma vazão maior de pasta, 4mL acima da vazão anterior. Este processo foi repetido até o momento que o leito entrou em colapso, com problemas na fluidização das partículas.

Ao final de cada experimento, foram construídas as curvas da temperatura de bulbo seco na saída do leito, do adimensional da queda de pressão e da umidade relativa do ar em função do tempo de processo. Com relação a curva da umidade relativa, realizou-se a subtração da umidade obtida no instante  $t=0$ , com o intuito de diminuir as interferências que as mudanças climáticas podem exercer nos resultados.

Enquanto os experimentos de secagem ocorriam, além do monitoramento das variáveis que envolvem o processo, também eram realizadas as coletas do pó de leite desnatado produzida no processo pelo “underflow” do ciclone. Para isso, a partir do momento que iniciava-se a alimentação da pasta no leito vibrofluidizado, a cada 10 minutos de experimento a massa de amostra era recolhida e pesada em um balança analítica, por um período de 30 minutos. Com as massas das amostras medidas foram obtidos os valores das taxas de produção de pó em função do tempo de processo. Depois, determinou-se a umidade em base úmida deste pó coletado, através do método gravimétrico de pesagem das amostras, em que a amostra era levada a uma estufa convectiva a 105°C por período de 24h, para posteriormente ser pesada novamente e obtidos os valores de umidade do pó em função do tempo de processo de secagem do leite desnatado.

Durante os ensaios também verificou se houveram acúmulo de material particulado de leite desnatado retido no interior do leito vibrofluidizado. Com o intuito de investigar esta causa, após os experimentos alcançarem o novo regime permanente, equivalente a um período de 30 minutos depois da vazão de pasta ser inserida na câmara de secagem, interrompia-se a alimentação da pasta e o leito era mantido ligado por mais 30 minutos, monitorando as variáveis, temperatura de bulbo seco e umidade relativa. Coletava-se a massa de amostra retida pela saída do ciclone e encaminhava a mesma a uma balança analítica para ser pesada. Com esta massa medida também foram calculadas a taxa de pó acumulado no leito vibrofluidizado durante estes 30 minutos que o equipamento ficou ligado, sem alimentação do leite desnatado.

### 3.4 Modelo Matemático

Com os dados experimentais obtidos, desenvolveu-se a modelagem do processo com o intuito de descrever os fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos durante a secagem de pasta com auxílio de material inerte em um leito vibrofluidizado. Para construir este modelo, primeiramente, considerou-se o equipamento semelhante a um tanque perfeitamente agitado (CST) e, a partir desta consideração, foram usadas as equações 3, 4 e 5 para elaborar a modelagem matemática, estabelecidas conforme as hipóteses presentes no item 2.3.

Ao efetuar a solução das equações apresentadas, realizou-se uma integração numérica utilizando-se o método Runge-Kuta, através de rotina desenvolvida com linguagem do programa MatLab 2015, considerando as seguintes condições iniciais na resolução do modelo:  $t=0: y_s=y_{s,t=0}$  e  $T_s=T_{gs,t=0}$ .

Devido a complexidade de se obter uma representação matemática do termo de acoplamento entre as fases (k), uma vez que engloba, simultaneamente, os fenômenos de evaporação de água e cinética de recobrimento das partículas inertes, resolveu-se usar uma rede neural artificial para determinar o comportamento deste termo durante o processo de secagem de pasta. Para tanto utilizou-se uma estrutura tradicional, com três camadas (de entrada, intermediária e de saída), denominadas de redes neurais do tipo *feed forward*. Nesta estrutura de rede, a camada de entrada teve 4 neurônios (tempo de secagem, amplitude,

frequência e vazão de alimentação da pasta) e na camada de saída apenas um neurônio (termo de acoplamento).

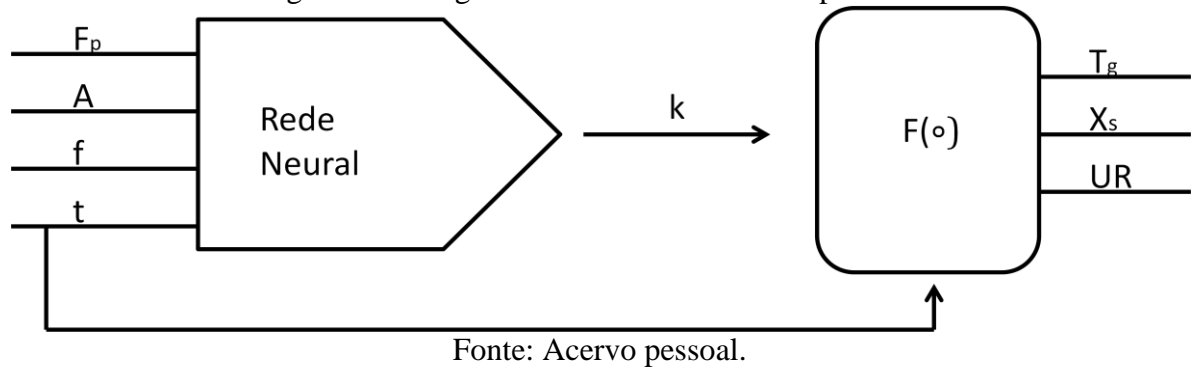
O desenvolvimento da rede neural artificial foi realizado em um toolbox presente no programa Matlab 2015, juntamente, com os dados experimentais oriundos da secagem do leite desnatado para as diferentes vazões de pasta, diferentes condições vibracionais e um tempo de operação de 2000 segundos. O treinamento destes dados foi realizado usando-se o algoritmo de treinamento *back propagation* e como critério de convergência, para determinação dos pesos que conectam as camadas entre si, foi usado o algoritmo de otimização Levenberg-Marquardt.

A escolha do número de neurônios necessários na camada intermediária foi realizado através do método de tentativa e erro (HIMMELBLAU, 2008). Inicialmente usou-se apenas um neurônio na camada intermediária e em seguida realizou-se os treinamentos da rede neural. Quando os resultados da rede não eram satisfatórios, era adicionado então mais um neurônio na camada intermediária e vários treinamentos eram realizados nesta nova rede. Este procedimento se repetiu até o momento em que o desempenho da rede neural construída apresentou um comportamento semelhante aos dados experimentais.

Com o intuito de verificar se a rede neural se comportou de forma adequada, principalmente interpolando dados para a obtenção de um resultado não fornecido a mesma durante o treinamento que, durante a determinação do número de neurônios necessários na camada intermediária, efetuava-se o treinamento da mesma retirando-se duas condições experimentais aleatórias, a fim de certificar bons resultados, principalmente, da sua boa generalização diante de novas situações.

Posteriormente, a rede neural artificial construída foi acoplada ao modelo CST, originando assim o modelo híbrido CST/Rede Neural. Este tipo de modelo pode ser representado conforme a figura 3.2, em que são mostrados os fluxos de dados através de um diagrama de blocos.

Figura 3.2: Diagrama do fluxo de dados do processo.



## CAPÍTULO 4

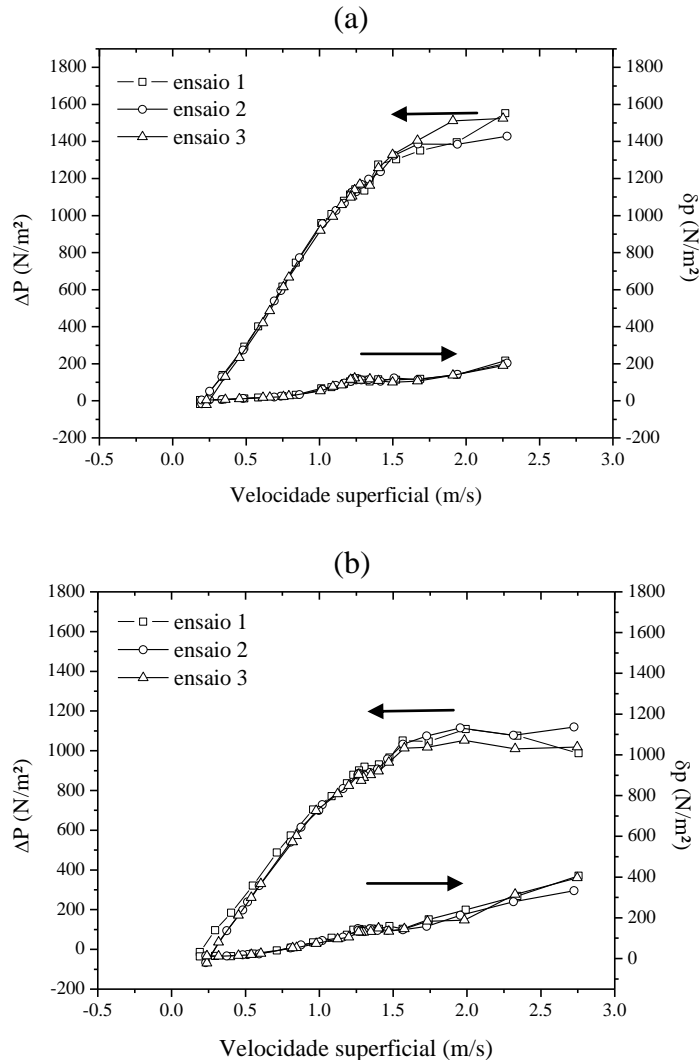
### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios experimentais obtidos durante o desenvolvimento da tese, através de gráficos padronizados e com auxílio de fotos tiradas durante cada experimento. A fim de deixar o texto mais organizado, dividiu-se o capítulo em três partes. No primeiro item serão mostrados e discutidos os resultados dos ensaios fluidodinâmicos para o leito seco, em que foram variados os diâmetros dos materiais inertes utilizados e as intensidades de agitação ajustadas ao leito. No item seguinte, serão mostrados e discutidos os resultados dos ensaios de evaporação da água, ensaios preliminares referentes ao leito úmido, em que foi usada uma condição vibracional, variando apenas a temperatura e a velocidade superficial do ar. Na terceira parte serão mostrados e analisados os dados dos experimentos realizados durante a secagem do leite desnatado, para condições de temperatura e velocidade do ar pré-selecionadas, variando a intensidade de agitação ajustada ao leito vibrofluidizado.

#### 4.1. Ensaio fluidodinâmicos

Neste item serão apresentadas as curvas características de queda de pressão e os desvios padrões de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito seco, quando três diferentes diâmetros de esferas de vidro (0,00119m, 0,00219m e 0,00319m) são utilizadas separadamente no leito vibrofluidizado. Primeiramente, a fim de avaliar a reprodutibilidade dos dados, foram realizadas três repetições dos ensaios com  $A=0,003m$  e  $f=400RPM$  e com  $A=0,015m$  e  $f=300RPM$ , para as esferas de 0,00319m, conforme apresentado na figura 4.1. Para esta análise, escolheu-se realizar tais repetições dos dados apenas para a maior esfera de vidro trabalhada, uma vez que este tamanho de esfera de vidro não apresenta uma fluidização homogênea do material particulado dentro do leito e, portanto, pode-se considerar um sistema de difícil reprodução dos ensaios experimentais.

Figura 4.1: Queda de pressão e desvio padrão de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibrofluidizado com esferas de vidro de 0,00319m e agitação com (a)  $A=0,003\text{m}$  e 400RPM e (b)  $A=0,015\text{m}$  e 300RPM, parametrizados por suas repetições.



Fonte: Acervo pessoal.

A figura 4.1 mostra as curvas características típicas de leitos que sofrem agitação, com a amortização do pico presente na transição da região de leito fixo para a região de fluidização, comumente encontrado nas curvas características dos leitos fluidizados convencionais (LFC). Quando se analisa a reprodutibilidade dos dados, observa-se que independentemente da agitação imposta no sistema, as curvas apresentaram uma boa reprodução destes dados. No entanto os maiores desvios encontrados, para ambas as curvas, foram na região de fluidização, porém com desvios inferiores a 10%. Estes resultados podem estar relacionados com o arranjo das partículas dentro do leito, uma vez que nesta região o ar começa a exercer uma influência significativa na dinâmica das partículas, que em conjunto

com a agitação imposta ao leito, apresentaram dificuldades em desenvolver o mesmo arranjo das esferas de vidro e, por isso, diferentes valores de queda de pressão do leito. Ao verificar os desvios padrões apresentados nas figuras, observa-se que as curvas ficaram sobrepostas para ambas às condições, confirmando a boa reprodutibilidade dos dados. Ao analisar o comportamento das curvas do desvio padrão, verifica-se que para ambas as curvas, a região de leito fixo apresentou valores inferiores a  $100 \text{ N/m}^2$ . À medida que aumentou a velocidade superficial do ar, verificou-se que quando o regime fluidizado foi alcançado os desvios começam a apresentar um aumento praticamente linear, no entanto os maiores valores foram obtidos para o leito particulado que foi submetido a maior amplitude e menor frequência. Porém, o comportamento das curvas não auxiliaram na determinação do instante em que iniciou-se o regime de fluidização do leito, visto que os valores do desvio padrão de queda de pressão começaram a aumentar antes mesmo que o ar influenciasse no sistema. Garim (1998) mostrou a importância de utilizar o desvio padrão de queda de pressão como uma ferramenta que contribui para a determinação da transição dos regimes e também na definição da velocidade de mínima fluidização, porém no presente caso a análise da curva de desvio padrão de queda de pressão não auxiliou na determinação da velocidade de mínima fluidização.

A boa reprodutibilidade dos dados apresentados pelo leito vibrofluidizado para estas duas intensidades de agitação, asseguram a qualidade dos dados obtidos, não só para este diâmetro de partícula, mas também para os outros diâmetros trabalhados. Visto que, esta esfera é classificada como pertencente ao grupo D por Geldart (1973), ou seja, partículas que apresentam durante a fluidização o surgimento de canais preferenciais e bolhas, fatores estes que poderiam ter dificultado a reprodução dos dados, já que as outras esferas de vidro utilizadas apresentam maior facilidade de fluidização no sistema.

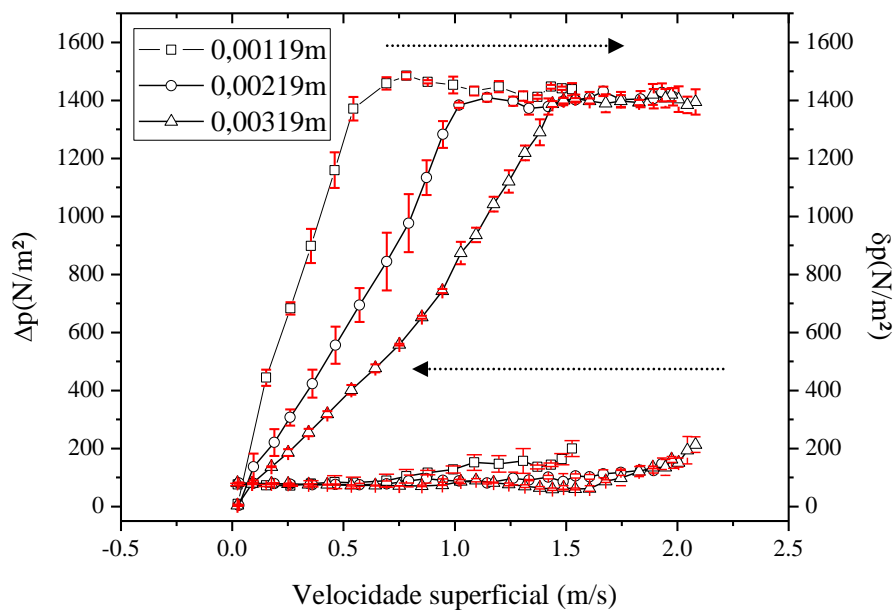
Na figura 4.2 são apresentadas os valores médios da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar e seus respectivos desvios padrões de queda de pressão obtidas para as três amostras quando o equipamento se comporta como um leito fluidizado convencional, parametrizado no diâmetro das esferas de vidro, a fim de analisar a influência que o mesmo pode exercer no comportamento dinâmico do leito quando  $\Gamma=0$ .

A partir desta figura, verifica-se que os valores de queda de pressão referentes a região de fluidização obtidos para as três esferas de vidro foram semelhantes, porém notou-se que as velocidades de mínima fluidização possuíam valores bem distintos. Para as esferas de  $0,00119\text{m}$  de diâmetro médio a  $U_{mf}$  foi de aproximadamente  $0,6\text{m/s}$ . As esferas com



0,00219m de diâmetro apresentaram  $U_{mf}$  de aproximadamente 1,05m/s. Para as esferas com 0,00319m de diâmetro  $U_{mf}$  teve seu valor em torno de 1,45m/s. Diante destes resultados ficou evidente que a velocidade de mínima fluidização foi influenciada, significativamente, pelo diâmetro do material particulado utilizado. Pois como trabalhou-se com o mesmo material, logo de mesma densidade, pode-se concluir que maiores partículas apresentam massa unitária maior, necessitam de maiores velocidades para alcançarem a fluidização.

Figura 4.2: Curvas características de um leito fluidizado convencional,  $\Gamma=0$ , parametrizadas no diâmetro das esferas de vidro.



Fonte: Acervo pessoal.

A mesma tendência da  $U_{mf}$  encontrada neste trabalho, foi observada em vários trabalhos da literatura, entre eles podemos citar Daleffe (2002) ao analisar a influência do diâmetro de esferas de sílica-gel no comportamento dinâmico de um leito vibrofluidizado retangular, e Daleffe (2005) quando analisou o comportamento dinâmico de um leito vibrofluidizado com seção circular, com materiais inertes com diferentes tipos e tamanhos.

Com relação ao desvio padrão de queda de pressão encontrado para as três esferas de vidro, verificou-se que na região de leito fixo as curvas ficaram muito próximas e constantes, mostrando que nesta região não existe uma flutuação da queda de pressão significativa na dinâmica do leito particulado. Na região de fluidização verificou-se que o aumento do diâmetro do material inerte fez com que as oscilações da queda de pressão diminuísse, ou seja, os maiores desvios foram encontrados para as esferas de vidro de 0,00119m. A partir do

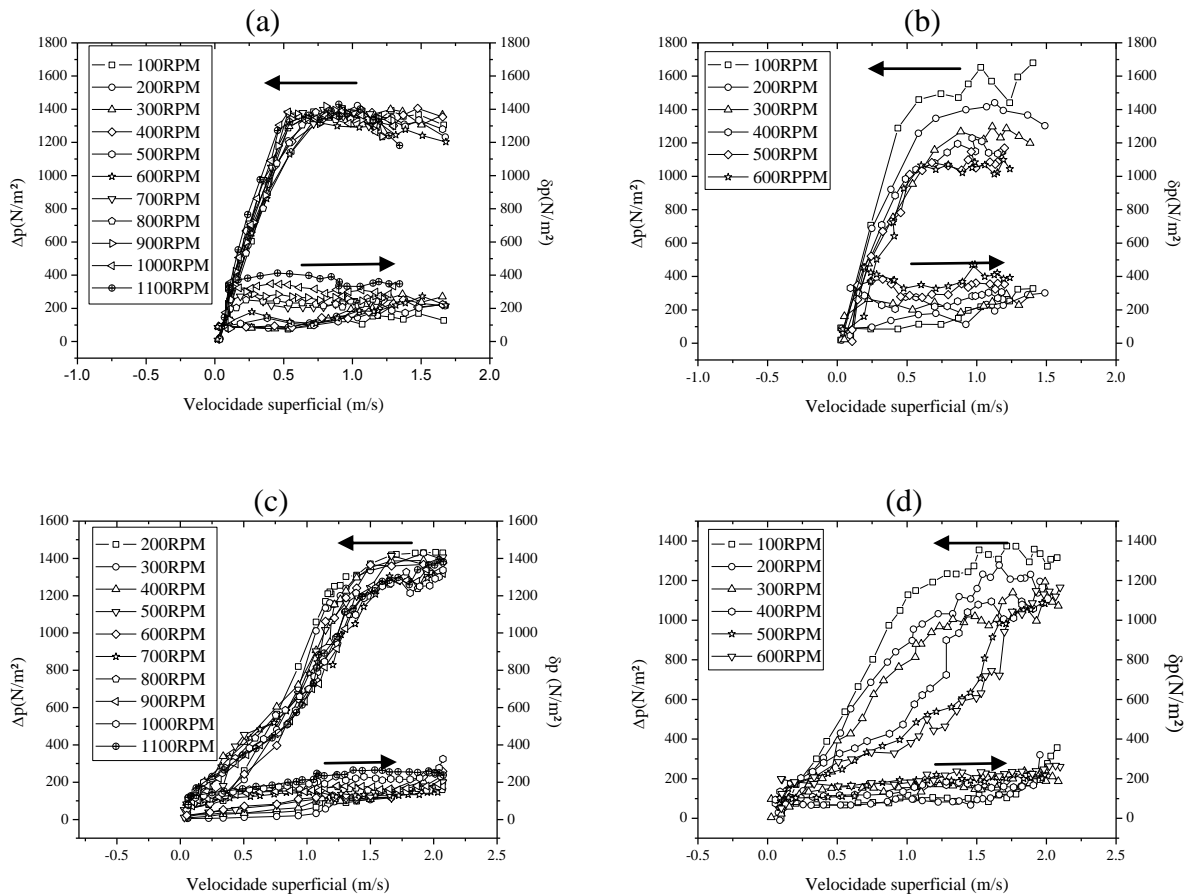
que foi observado para a região de fluidização, pode-se considerar que estas esferas de vidro foram impulsionadas facilmente pelo ar dentro da câmara de secagem, por serem o material inerte mais leve, promovendo maior movimentação das partículas e, conseqüentemente, maior flutuação da queda de pressão. As outras esferas de vidro (0,00219m e 0,00319m) por serem maiores, apresentaram força inercial maior, diminuindo a movimentação das mesmas dentro do leito e, por conseqüência, oscilação da queda de pressão menor.

A seguir serão apresentadas as curvas características do leito vibrofluidizado obtidas para as três esferas de vidro e diferentes intensidades de agitação, com o intuito de analisar a influência que o diâmetro do material inerte pode exercer na dinâmica do leito, quando o mesmo é submetido a diferentes valores do adimensional de vibração. Na figura 4.3 serão mostradas as curvas de queda de pressão e desvio padrão de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar, obtidas para o leito particulado com esfera de vidro de 0,00119m e 0,00319m de diâmetro, quando o mesmo foi submetido a intensidades de agitação com amplitudes de 0,003m (a) e (c) e de 0,015m (b) e (d), respectivamente, combinadas a diferentes frequências. Como os resultados foram muito semelhantes para todas as esferas, os valores de queda de pressão obtidos para a esfera de vidro de 0,00219m não serão apresentados no restante deste trabalho, mostrando assim os resultados apenas encontrados para as condições extremas (0,00119m e 0,00319m).

Ao analisar a figura 4.3, de uma maneira geral, verificou-se que para cada amplitude implementada no leito vibrofluidizado, o comportamento fluidodinâmico foi semelhante para as duas esferas de vidro utilizadas neste trabalho. Nas figuras 4.3-a e 4.3-c, pode-se constatar que quando a vibração apresenta uma amplitude de 0,003m, o aumento da frequência vibracional não interferiu de maneira significativa no comportamento fluidodinâmico do leito, uma vez que as curvas características ficaram muito próximas, tanto na região de leito fixo, quanto na região de fluidização do meio particulado. No entanto, para as esferas de vidro de 0,00319m de diâmetro, figura 4.3-c, é possível verificar uma pequena tendência na região de leito fixo ( $U_s < U_{mf}$ ), mostrando que a queda de pressão diminuiu com o aumento da frequência vibracional. O que pode explicar este comportamento das curvas é a porosidade do leito de partículas, uma vez que esta esfera de vidro corresponde ao maior diâmetro trabalhado e que a porosidade é inversamente proporcional ao seu diâmetro (YU; FENG; ZOU; YANG, 2003). Logo, pode-se considerar que aumento da agitação do sistema, através do aumento da frequência vibracional, possibilitou que a porosidade do meio ficasse maior,

facilitando que o ar escoasse pelo leito de esferas de vidro e apresentasse menores valores de queda de pressão.

Figura 4.3: Curvas de queda de pressão e desvio padrão de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar, para o leito com esferas de vidro de 0,00119m de diâmetro, amplitude de 0,003m (a) e 0,015m (b), e esferas de vidro de 0,00319m de diâmetro, amplitude de 0,003m (c) e 0,015m (d), ambos os gráficos parametrizados pelas diferentes frequências.



Fonte: Acervo pessoal.

Ao aumentar a amplitude do sistema vibracional para 0,015m, conforme mostrado nas figuras 4.3-b e 4.3-d, foi possível verificar que as curvas características sofreram interferência da frequência vibracional. A partir destes gráficos, constatou-se que o aumento da frequência promoveu uma redução significativa dos valores de queda de pressão, na região de leito fixo e na região referente a fluidização. Mesmo se tratando de uma agitação maior, em que as esferas de vidro estiveram em intensa movimentação antes mesmo de alcançarem a fluidização, neste trabalho vamos considerar a região referente ao “leito fixo”, como a região que antecede a fluidização das esferas de vidro e não a região em que vai existir uma pequena

expansão do material particulado e uma leve agitação das mesmas no interior da câmara de secagem, como definido por Kunii e Levenspiel (1991).

Na figura 4.3-d, porém, não ficou evidente o momento de transição da região referente ao leito fixo para a região de fluidização das esferas de vidro, mostrando principalmente que as condições referentes as maiores frequências vibracional, como por exemplo, 400RPM, 500RPM e 600RPM a mudança de comportamento ocorreu em uma faixa de velocidade superficial do ar e não em um determinado valor. Este tipo de curva é apresentado por Strumillo e Pakowski (1980), quando os autores exibem as diferentes formas que a curva fluidodinâmica pode ter diante de diferentes intensidades de agitação e características do material particulado. Porém, este tipo de curva foi encontrada para partículas de areia com diâmetro de  $50,8 \times 10^{-5}$  m e baixa intensidade de agitação,  $\Gamma < 1$ . Condição totalmente oposta ao utilizado neste trabalho, pois foi usado um número adimensional de vibração maior que 1 e um material particulado com 0,00319m diâmetro. A partir deste resultado fica evidente que muito ainda precisa ser estudado sobre o comportamento fluidodinâmico do leito vibrofluidizado, na presença de diferentes materiais particulados e sob diferentes intensidades de agitação.

Diante do que foi observado para os dois diâmetros de esferas de vidro e como se tratam de material inerte em que a força de van der Waals deixa de ser significativa no leito particulado, um simples balanço de energia pode auxiliar na compreensão do comportamento dos resultados obtidos. Neste sistema tem-se: as energias oriundas das forças de arraste do fluido/partícula, a energia que vem do campo gravitacional, a força peso do material particulado e a energia produzida pela vibração do leito. A energia resultante no sistema faz com que uma quantidade de energia seja transferida para as esferas de vidro, ou seja, o trabalho desenvolvido sobre o leito particulado, decorrente da força resultante que engloba o sistema, fosse transferido para o material inerte na forma de energia cinética e potencial.

Para a intensidade de agitação com amplitude de 0,003m, a força desenvolvida pela vibração e transferida para as esferas de vidro através de energia cinética e potencial, não foram suficientes para promover uma movimentação significativa das mesmas dentro da câmara de secagem, mesmo diante do aumento da frequência vibracional. Portanto, pode-se considerar que as estruturas do meio particulado foram bem semelhantes e, devido a isso, as curvas características ficaram bem próximas umas das outras.

Quanto aumentou a amplitude exercida pela base do leito, juntamente com o aumento da frequência vibracional, maior foi a energia transferida para as partículas e, conseqüentemente, maior foi o deslocamento do material particulado dentro da câmara de secagem. Diante disso, o ar escoou mais facilmente pelo leito de esferas de vidro e promoveu a redução da queda de pressão assim que aumentou-se a frequência vibracional. Entretanto, deve-se deixar claro, que não pode-se verificar visualmente que o leito encontrou-se fluidizando, apenas foi observado que o mesmo estava com uma intensa agitação.

Com relação às curvas de desvio padrão de queda de pressão, foi observado que as oscilações de queda de pressão foram mais influenciadas pelo diâmetro do material particulado do que pela intensidade de agitação implementada no leito vibrofluidizado. Para as esferas de vidro com 0,00119m, conforme apresentado nas figuras 4.3-a e 4.3-b, como se trata do inerte com a menor massa unitária utilizada neste trabalho, o aumento da frequência vibracional promoveu maiores oscilações de queda de pressão, independente da amplitude de agitação implementada no equipamento. No entanto, foi constatado que as curvas referentes as maiores frequências vibracionais (superiores a 700RPM para amplitude de 0,003m e 300RPM para amplitude de 0,015m), as oscilações da queda de pressão já foram iniciadas na região de leito fixo e se mantiveram praticamente constante durante o experimento. Tais resultados mostraram que a vibração passou a dominar o comportamento fluidodinâmico do leito desde o início do processo. Este comportamento também está de acordo com o que foi apresentado por Daleffe (2005) e Meili (2009), ao analisarem o comportamento fluidodinâmico de diferentes esferas de vidro diante de altas intensidades de agitação.

Tal resultado pode estar relacionado com o número de colisões, pois ao aumentar a frequência, a circulação das esferas de vidro dentro da câmara de secagem tornaram-se maiores, promovendo o aumento das colisões entre partícula-partícula e partícula-parede. Este fator pode ter desencadeado uma configuração da estrutura do leito particulado mais heterogênea, tornando assim maiores as oscilações da queda de pressão.

Quando foram analisadas as curvas de desvio padrão de queda de pressão obtidas para as esferas de vidro com 0,00319m de diâmetro, conforme apresentado nas figuras 4.3-c e 4.3-d, também foi verificado que o aumento da frequência vibracional promoveu o aumento dos valores do desvio padrão de queda de pressão, tanto na região de leito fixo, quanto para a região de fluidização das esferas de vidro. No entanto, como se tratam de um material particulado mais pesado, as oscilações da queda de pressão foram menores do que obtido para as esferas de 0,00119m. Estes resultados mostram que a esfera de vidro com 0,00319m

diâmetro, por ter maior massa unitária, sua força inercial também foi maior e o seu deslocamento dentro da câmara de secagem foi menor. Apesar disso, ainda foi verificado que o aumento da frequência vibracional influenciou na configuração do leito particulado, promovendo assim altas oscilações da queda de pressão.

Nestas figuras foi constatado também que quando a fluidização foi alcançada no sistema, os valores do desvio padrão de queda de pressão tiveram um pequeno aumento, indicando que a força de arraste do fluido passou a apresentar uma pequena influência no sistema e promover a oscilação da queda de pressão um pouco maior. Diante deste comportamento da curva, verificou-se que na região de leito fixo a queda de pressão foi influenciada pelo aumento da frequência vibracional, produzindo maiores oscilações da queda de pressão, devido ao aumento da circulação das esferas de vidro, que favoreceram uma configuração de leito particulado mais heterogênea. Na fluidização, a força de arraste do fluido passou a influenciar o sistema fluido/partícula, sendo o fator que apresentou maior influência nas mudanças da estrutura do pacote de esferas, consecutivamente, promovendo um pequeno aumento da flutuação da queda de pressão.

Garim (1998) em seu trabalho sugeriu que as curvas de desvio padrão de queda de pressão podem ser utilizadas como uma ferramenta auxiliar na determinação da velocidade de mínima fluidização, uma vez que o autor mostrou, diante de seus resultados, que ficou evidente a transição da região referente ao leito fixo para a região de fluidização. Porém, pode-se concluir que não são todas as condições em que é possível utilizar esta ferramenta. A partir destes resultados, foi visto para a vibração que apresentou as maiores intensidades de agitação, uma influência mais significativa no comportamento dinâmico, tanto para a amplitude de 0,003m e 0,015m em que o meio particulado era de 0,00119m de diâmetro médio. Desta forma, a movimentação das esferas de vidro foi mais intensa e possibilitou que altas oscilações da queda de pressão fossem obtidas, antes mesmo que a fluidização fosse alcançada no sistema.

A analisar os valores da velocidade de mínima fluidização encontrados através da metodologia da inserção de duas retas tangentes às curvas características, conforme apresentado na tabela 4, pode-se constatar que ao aumentar a frequência vibracional, houve um aumento pouco expressivo desta variável. Entretanto, este comportamento foi mais evidente assim que aumentou-se o diâmetro da esfera de vidro e a amplitude de agitação.

Tabela 4: Velocidades de mínima fluidização encontradas com o auxílio das retas tangentes, segundo a metodologia de Bratu e Jinescu (1971), para os leitos das esferas de vidro com 0,0019m e 0,00319m de diâmetro médio, quando submetidas a diferentes intensidades de agitação.

Frequência (RPM)	Diâmetro de 0,00119m		Diâmetro de 0,00319m	
	A=0,003m	A=0,015m	A=0,003m	A=0,015m
	$U_{mf}$ (m/s)	$U_{mf}$ (m/s)	$U_{mf}$ (m/s)	$U_{mf}$ (m/s)
100	-	0,5	-	1,3
200	0,51	0,60	1,32	1,39
300	0,51	0,64	1,35	1,35
400	0,55	0,6	1,35	1,48
500	0,51	0,58	1,38	1,65
600	0,53	0,56	1,45	1,68
700	0,55	-	1,54	-
800	0,57	-	1,52	-
900	0,61	-	1,52	-
1000	0,58	-	1,55	-
1100	0,61	-	1,55	-
Valor médio	$0,553 \pm 0,04$	$0,582 \pm 0,05$	$1,45 \pm 0,09$ m/s	$1,475 \pm 0,16$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados são semelhantes aos encontrados na grande maioria dos trabalhos presentes na literatura, como por exemplo, Gupta e Mujumdar (1980), Camargo (1998), Daleffe (2005), Xu e Zhu (2006) e Meili, Daleffe e Freire (2012), porém tal tendência não apresenta um significado físico.

Conforme observado nos resultados do comportamento fluidodinâmico do leito vibrofluidizado, deve-se tomar muito cuidado ao caracterizar a dinâmica de um leito particulado submetido a agitação, uma vez que as condições vibracionais impostas ao sistema que englobam este equipamento, influenciaram significativamente no comportamento e nas formas das curvas características do leito particulado. Estes resultados mostraram que para as esferas de vidro analisadas, de um modo geral, tais comportamentos foram bem semelhantes, ou seja, quando o leito vibrofluidizado foi submetido a uma vibração com amplitude de 0,003m, a diferença da frequência vibracional ajustada ao sistema pouco influenciou na dinâmica do leito, visto que a expansão do material particulado dentro do equipamento não foi significativa para exercer qualquer modificação na configuração do material inerte e nas curvas características. Ao aumentar a amplitude do processo, o aumento da frequência vibracional promoveu uma influência significativa no comportamento fluidodinâmico do leito, dado que os menores valores de queda de pressão e os maiores valores do desvio padrão de queda de pressão foram encontrados para esta amplitude.

Porém o mesmo não pôde ser verificado para a velocidade de mínima fluidização, pois independente da amplitude ajustada ao leito e do diâmetro de inerte usado, os valores não apresentaram uma variação significativa com o aumento da frequência. Confirmando que para a metodologia utilizada na determinação desta variável, os valores encontrados não apresentam qualquer significado físico que possam explicar a interferência da agitação na mesma.

#### **4.2 Testes de evaporação de água e secagem de leite em função do diâmetro da partícula**

Neste item serão apresentados os resultados obtidos pelos testes de evaporação de água e secagem de pasta que antecederam os ensaios de secagem de leite desnatado em leito vibrofluidizado e também auxiliaram na seleção do diâmetro da esfera de vidro e das condições experimentais para o desenvolvimento dos mesmos. Para isso primeiramente serão mostrados os dados referentes aos testes elaborados que analisaram a influência que o diâmetro da esfera de vidro pode exercer no processo de evaporação de água, quando os mesmos foram submetidos a temperatura do ar de 100°C, vazão do ar de 1,25m<sup>3</sup>/min, vazão de pasta igual a 18mL/min e agitação com  $\Gamma=0,65$  ( $A=0,015$ m e  $f=200$  RPM). Inicialmente escolheu-se esta intensidade de agitação por corresponder a uma das menores condições de trabalhado, a fim de poder verificar unicamente a influência dos fenômenos de transferência de calor e massa no processo de secagem. Diante disso, na figura 4.4 serão apresentados os gráficos referentes as curvas de umidade relativa ( $UR-UR_0$ ) e umidade absoluta ( $UA-UA_0$ ) em função do tempo de processo, referentes a estes experimentos citados, parametrizado no diâmetro das esferas de vidro utilizadas neste trabalho.

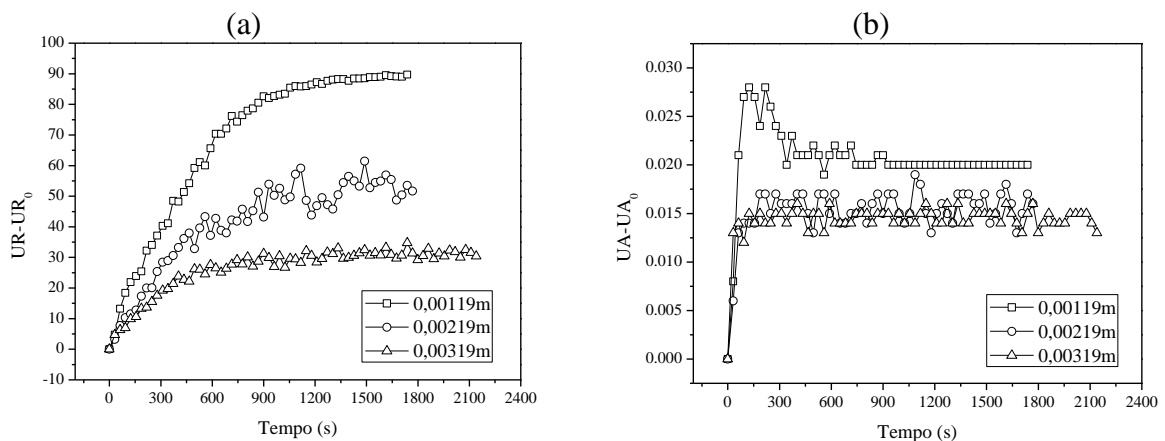
De acordo com a figura 4.4-a, pode-se verificar que o aumento do diâmetro promoveu a redução do potencial evaporativo do leite, pois para o processo que usou a esfera de vidro com 0,00119m de diâmetro, a umidade relativa atingiu o novo regime permanente perto dos 90% da saturação do ar e o processo que usou a esfera de vidro com 0,00319m de diâmetro a umidade relativa atingiu este novo regime em torno de 25% da saturação do ar. Este comportamento mostra que quando ocorre a redução do diâmetro do material particulado, um maior número de partículas participou do processo de evaporação, uma vez que foi mantida a massa constante para todas as esferas de vidro. Este aumento da quantidade de inerte tornou



maior a área de contato entre a água e o material particulado, possibilitando que uma maior quantidade de água tenha sido evaporada e resultasse no aumento da saturação do ar.

Para confirmar o aumento da quantidade de água evaporada, que as curvas presentes na figura 4.4-b mostram o comportamento da umidade absoluta obtido durante o processo de evaporação de água diante dos diferentes diâmetros das esferas de vidro. Nesta figura fica evidente que o menor diâmetro da esfera de vidro teve uma maior quantidade de água evaporada no processo. No entanto, nota-se que mesmo o diâmetro de 0,00219m tenha apresentado na figura 4.4-a o novo regime permanente em torno de 50% da saturação do ar, a quantidade de água evaporada foi praticamente a mesma obtida para a esfera de vidro com diâmetro de 0,00319m, como mostrado na figura 4.4-b.

Figura 4.4: Umidade relativa e absoluta do ar durante a evaporação de água para agitação do leito com  $\Gamma=0,65$  (0,015m e  $f=200$ RPM) e  $T=100^{\circ}\text{C}$  parametrizado no diâmetro das esferas de vidro.

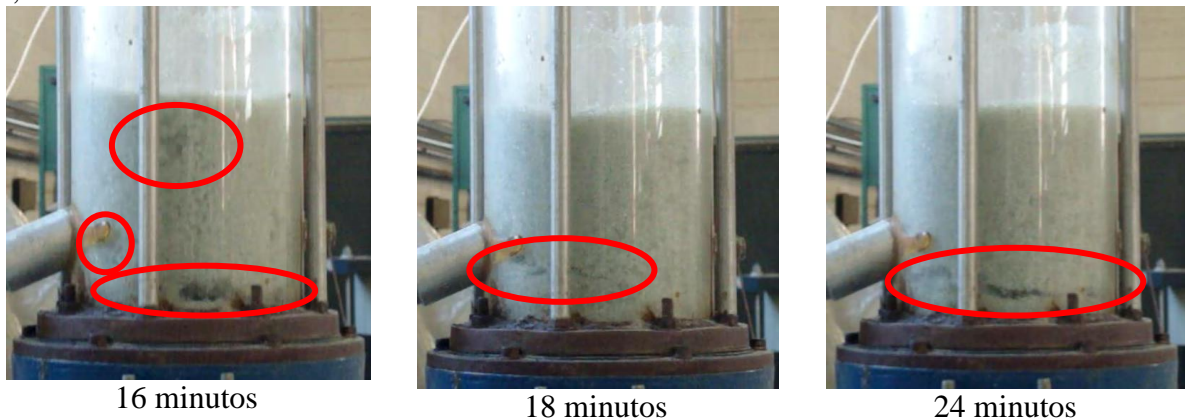


Fonte: Acervo pessoal.

Conforme os resultados apresentados na figura 4.4, ficou evidente que o melhor tamanho de inerte para o desenvolvimento do restante dos experimentos com água, era a esfera com o diâmetro de 0,00119m. Para confirmar esta conclusão, decidiu-se realizar um teste de secagem, usando a pasta selecionada para o desenvolvimento deste trabalho e esta esfera de vidro. O teste consistiu em efetuar a secagem do leite desnatado nas mesmas condições de temperatura, vazão do ar e vazão de pastas usadas na evaporação de água, ou seja, vazão de alimentação de pasta de 18mL/min, temperatura do ar de  $100^{\circ}\text{C}$ , vazão do ar de  $1,25\text{m}^3/\text{min}$  e intensidade de agitação com  $A=0,015\text{m}$  e  $f=200$ RPM.

No início do teste, devido a pouca quantidade de leite desnatado no interior da câmara de secagem, observou-se a fluidização das esferas de vidro e uma pequena produção do pó na saída do ciclone. No entanto, após 15 minutos de experimento, verificou-se que não existia mais a produção do leite desnatado em pó. A partir deste instante, a fluidização do inerte foi comprometida, tornando o leito das esferas de vidro ainda mais úmido e, por consequência, aumentando a aglomeração do material particulado, até o momento que praticamente todas as esferas de vidro formaram um bloco unitário. Este comportamento do inerte úmido no processo propiciou o desenvolvimento de um movimento pistonado dentro do leito vibrofluidizado, confirmando assim a desfluidização do leito. Na figura 4.5 são apresentadas algumas fotos tiradas no instante de 16, 18 e 24 minutos de experimento, com a finalidade de mostrar a aglomeração das esferas de vidro durante o processo de secagem de leite desnatado.

Figura 4.5: Fotos de diferentes instantes do processo do secagem de leite desnatado a  $T=100^{\circ}\text{C}$ , vazão do ar de  $1,25\text{m}^3/\text{min}$ , vazão de pasta de  $18\text{mL}/\text{min}$  e esferas de vidro de  $0,00119\text{m}$  diâmetro.



Fonte: Acervo Pessoal.

Como o comportamento fluidodinâmico do leito seco para as três esferas de vidro no leito vibrofluidizado já foram apresentadas anteriormente, a partir deste teste pôde-se verificar que ao adicionar o leite desnatado no sistema, além das forças peso, arraste, a força gerada pelo trabalho desenvolvido no equipamento durante a agitação e as colisões entre as partículas e partículas-parede adquiridas durante o processo, passam a existir outros tipos de forças que podem ser consideradas um complicador a mais neste novo sistema fluido-pasta-partícula. Pois além das forças citadas que envolvem o leito seco, a presença do leite desnatado no novo sistema faz com que a superfície do material inerte fique toda recoberta com a mesma, propiciando a existência de pontes líquidas e sólidas que são responsáveis por tornarem o leito particulado mais coeso. A existência destes fatores acarretou na mudança da dinâmica do material inerte dentro do leito vibrofluidizado, diante do tipo de contato e do choque entre as

esferas de vidro que ficaram diferentes dentro da câmara de secagem, devido principalmente as forças viscosas que começaram a dominar a movimentação do material particulado e, por consequência influenciar no sistema.

Diante do que foi observado neste teste de secagem, pode-se verificar que como as esferas de vidro com 0,00119m de diâmetro são partículas mais leves, a movimentação do material particulado, provocada pela agitação do leito vibrofluidizado e pela velocidade do ar, não foram suficientes para que as colisões geradas dentro do leito promovessem a ruptura das pontes, sólidas e líquidas, e realizassem a quebra da película de leite desnatado desenvolvida na superfície da esfera de vidro. Ou seja, este tamanho de inerte impossibilitou a produção do pó e facilitou o recobrimento e aglomeração durante o processo de secagem.

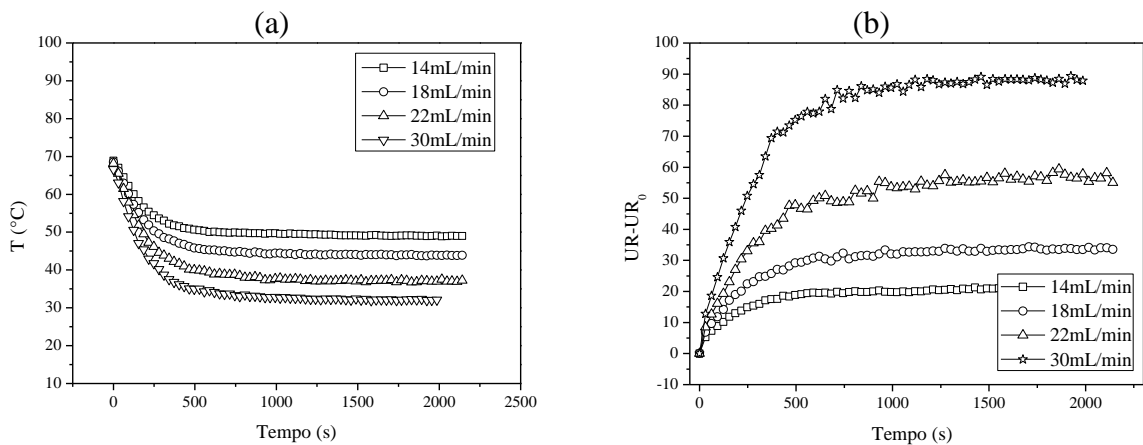
Apesar das esferas de vidro com 0,00119m de diâmetro terem apresentado maior potencial evaporativo do leito durante a evaporação de água, isso não significa que durante a secagem de uma pasta real este material particulado tenha que apresentar o mesmo desempenho. A partir deste fato, então, decidiu-se usar a esfera de 0,00319m de diâmetro para o desenvolvimento do restante dos experimentos, por corresponder a maior esfera de vidro usada neste trabalho e, portanto, aumentar as possibilidades de adquirir maior quantidade de movimento para poder vencer as forças viscosas que vão começar a dominar o processo de secagem.

Voltando agora aos testes realizados com água como uma pasta “ideal” a ser adicionado ao sistema das esferas de vidro, que serão analisadas a influência da temperatura e da velocidade do ar no processo de evaporação, nas figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 serão apresentados os gráficos referentes a temperatura e a umidade relativa do ar na saída do leito diante de diferentes temperaturas do ar de entrada e vazões de ar no leito. Na figura 4.6 serão apresentados os resultados da temperatura (a) e umidade relativa do ar (b) obtidos na saída do leito, referentes aos experimentos realizados com a temperatura do ar de entrada 80°C e com uma vazão de ar de 1,25m<sup>3</sup>/min, ambos parametrizados nas vazões de alimentação de água destilada. Como o comportamento das variáveis apresentadas foram semelhantes para as outras vazões de ar trabalhadas, serão apresentados apenas os resultados obtidos para a vazão de 1,25m<sup>3</sup>/min, a fim de não sobrecarregar a tese com gráficos semelhantes.

Na figura 4.6-a, observou-se que assim que a água é alimentada na câmara de secagem, a temperatura de saída do leito diminui até alcançar um novo patamar onde permanece praticamente constante. Também foi constatado que ao aumentar a vazão de água, o valor da temperatura alcançada no novo sistema tende a diminuir, o que era esperado. Como

um exemplo, ao inserir no equipamento uma vazão de alimentação de 14mL/min, a temperatura do ar na saída do leito atingiu no novo regime a 50°C. Ao aumentar a vazão para 22mL/min, a temperatura do ar na saída do leito reduziu até 39°C. O comportamento desta variável está diretamente relacionado com a quantidade de energia empregada para promover a evaporação da água presente na superfície da esfera de vidro. Pois ao aumentar a quantidade de água alimentada no processo, uma maior quantidade de energia será necessária para promover a evaporação, resultando assim em uma maior diferença entre as temperaturas do início e do final do processo.

Figura 4.6: Temperatura do ar de saída (a) do leito e umidade relativa do ar (b) do processo de evaporação de água para agitação do leito com  $\Gamma=0,65$  (0,015m e  $f=200\text{RPM}$ ), vazão de ar de  $1,25\text{m}^3/\text{min}$  e  $T=80^\circ\text{C}$ , ambos os gráficos parametrizados na vazão de alimentação de água.

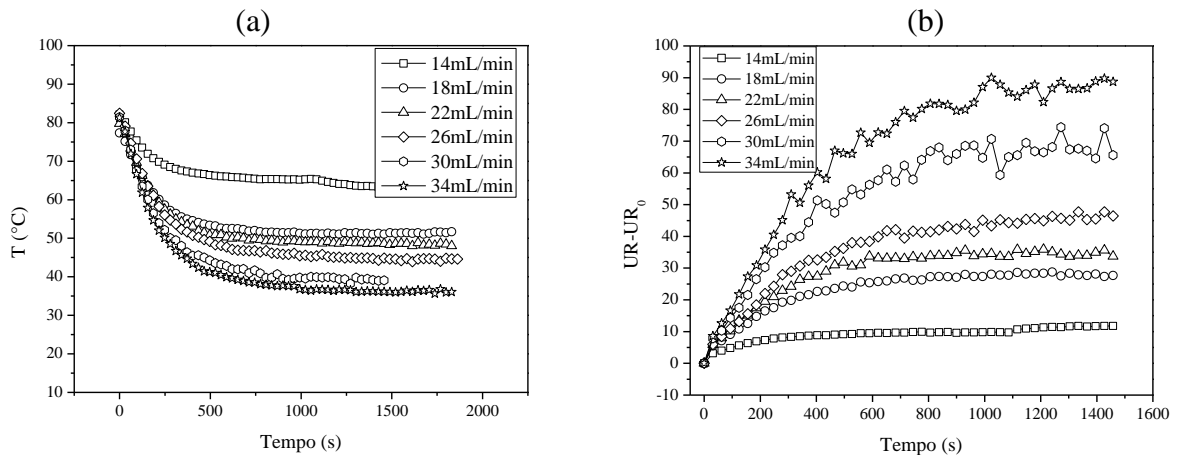


Fonte: Acervo pessoal.

Ao analisar a figura 4.6-b, observou-se que a umidade relativa do ar na saída do leito apresentou um comportamento inverso do encontrado para a temperatura do ar, pois assim que a água foi alimentada no interior da câmara de secagem, a umidade relativa do ar tendeu a aumentar até atingir um novo valor que não variou mais com o tempo, correspondendo ao regime permanente. Este novo valor atingido no processo aumentou, como esperado, à medida que aumentou-se a vazão de alimentação de água no equipamento, pois quando aumentou a vazão de água de 14mL/min para 22mL/min, a saturação do ar na saída do leito aumentou de 20% para 55%. Com relação ao tempo necessário para alcançar o novo regime, o aumento da vazão de água resultou em um tempo maior, variando de 450s para 800s. Este comportamento da umidade relativa mostra que para maiores quantidades de água no processo de evaporação, a quantidade de energia necessária para evaporação de água aumenta

e, por consequência, uma maior quantidade mássica de água é transferida na forma de vapor para o ar, aumentando a saturação do mesmo na saída do leito.

Figura 4.7: Temperatura do ar de saída (a) do leito e umidade relativa do ar (b) do processo de evaporação de água para agitação do leito com  $\Gamma=0,65$  ( $0,015m$  e  $f=200RPM$ ), vazão de ar de  $1,25m^3/min$  e  $T=100^\circ C$ , ambos os gráficos parametrizados na vazão de alimentação de água.



Fonte: Acervo pessoal.

Ao aumentar a temperatura do ar no processo, a figura 4.7 mostra o comportamento das variáveis temperatura e umidade relativa do ar na saída do leito, para o processo de evaporação de água a uma agitação com  $\Gamma=0,65$  ( $A=0,015m$  e  $f=200RPM$ ), a temperatura do ar igual a  $100^\circ C$  e vazão do ar de  $1,25m^3/min$ . Diante das curvas mostradas na figura 4.7-a, a variável temperatura do ar na saída do leito apresentou o mesmo comportamento citado anteriormente para a figura 4.6-a. No entanto, foi verificado que o aumento da temperatura do ar fez com que a vazão de alimentação máxima de pasta aumentasse no sistema, pois ao comparar as figuras 4.6-a e 4.7-a, esta variável aumentou de  $30mL/min$  para  $34mL/min$ . Além deste fator, verificou-se que o aumento da temperatura do ar no processo fez com que a diferença entre a temperatura do ar na entrada e na saída do equipamento, juntamente com o tempo necessário para o sistema alcançar o novo regime, fossem reduzidos. Visto que na condição de  $22mL/min$  e  $80^\circ C$ , a nova temperatura alcançada foi  $39^\circ C$  e o tempo para alcançar o novo patamar foi  $650s$ . O aumento da temperatura do ar para  $100^\circ C$ , usando a mesma vazão de água, fez com que a temperatura do ar na saída do leito alcançasse  $50^\circ C$  em um tempo de  $500s$ .

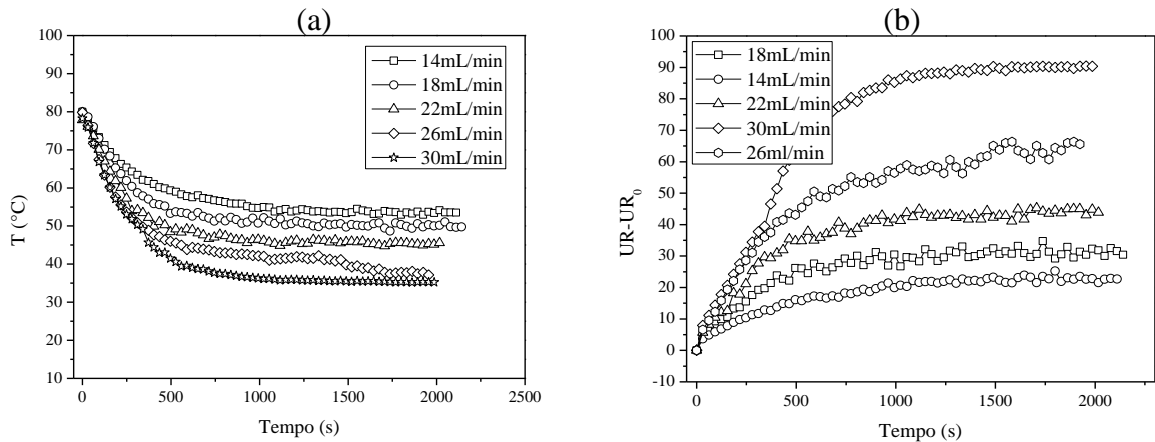
Esta influência do aumento da temperatura do ar no processo está relacionado com a quantidade de energia fornecida para a evaporação de água, pois o aumento desta variável faz

com que a capacidade do ar de absorver água na forma de vapor aumente. Diante disso, quanto maior a energia fornecida para o processo, menor será a diferença entre a temperatura de início e no final da câmara de secagem e, por consequência, mais rapidamente a água vai ser evaporada para o fluxo de ar, reduzindo o tempo necessário para atingir o novo regime permanente.

Como a umidade relativa apresenta um comportamento inverso ao da temperatura do ar na saída do leito, a figura 4.7-b mostra que o aumento da temperatura do ar do leito faz com que a capacidade do sistema em absorver o vapor de água aumente e, devido a isso, a saturação do leito e o tempo para alcançar a nova saturação do ar na saída do sistema sejam reduzidos, quando uma mesma quantidade de água é fornecida no sistema. Ao comparar as figuras 4.6-b e 4.7-b, verifica-se que o aumento da temperatura do ar promoveu uma redução na saturação do ar na saída do leito e no tempo para alcançar o novo regime, pois para a condição referente a vazão de 30mL/min e temperatura de 80°C o sistema alcançou uma umidade relativa de 90% em um intervalo de 800s. Para a mesma vazão de água, agora com uma temperatura do ar de 100°C, o sistema atingiu um valor de umidade relativa de 63% em um período de 700 segundos.

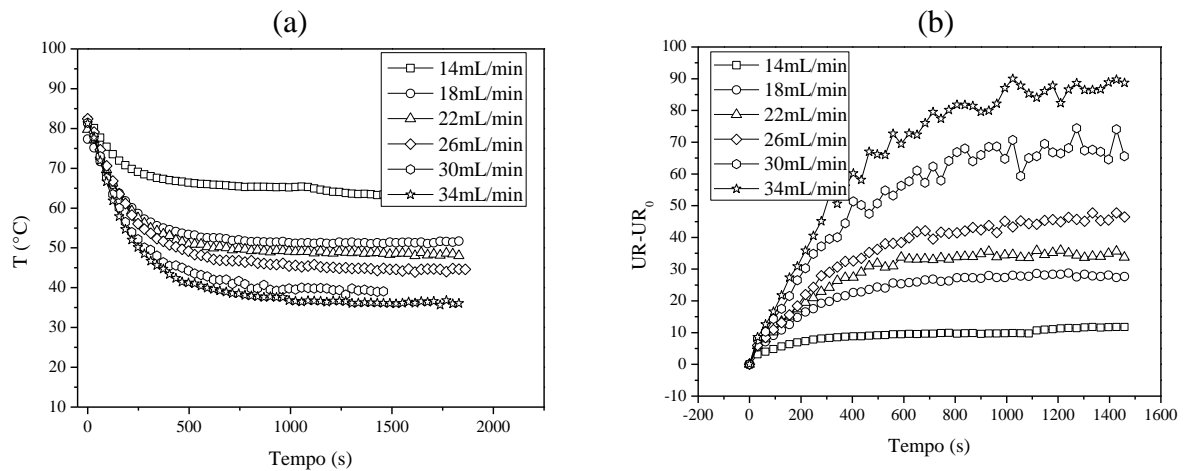
Depois de verificar a influência que a temperatura exerceu no processo de evaporação de água, passou-se a examinar a atuação da velocidade do fluido durante o procedimento. Diante disso, nas figuras 4.8 e 4.9 serão mostradas as curvas de temperatura do ar na saída do leito e a umidade relativa do mesmo, variando a vazão de ar e as vazões de água destilada inseridas no leito. Os resultados que serão mostrados são referentes as condições extremas de vazão de ar trabalhadas nesta tese, uma vez que, os resultados relacionados a vazão de ar de 1,17m<sup>3</sup>/min (30% acima da  $U_{mf}$ ) foram semelhantes aos obtidos para a vazão de 1,07m<sup>3</sup>/min. Tal comportamento já mostra que para poder observar uma influência do ar no processo de evaporação de água, a vazão do fluido devem ser acima de 30% da velocidade de mínima fluidização.

Figura 4.8: Temperatura do ar de saída (a) do leito e umidade relativa do ar (b) do processo de evaporação de água para agitação do leito com  $\Gamma=0,65$  (0,015m e  $f=200\text{RPM}$ ), vazão de ar de  $1,07\text{m}^3/\text{min}$  e  $T=100^\circ\text{C}$ , ambos os gráficos parametrizados na vazão de alimentação de água.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4.9: Temperatura do ar de saída (a) do leito e umidade relativa do ar (b) do processo de evaporação de água para agitação do leito com  $\Gamma=0,65$  (0,015m e  $f=200\text{RPM}$ ), vazão de ar de  $1,25\text{m}^3/\text{min}$  e  $T=100^\circ\text{C}$ , ambos os gráficos parametrizados na vazão de alimentação de água.



Fonte: Acervo pessoal.

Conforme os resultados obtidos nas figuras 4.8-a e 4.9-a, verificou-se que ao aumentar a vazão de ar no processo de evaporação de água de  $1,07\text{m}^3/\text{min}$  para  $1,25\text{m}^3/\text{min}$ , a capacidade evaporativa do leito através da vazão máxima de água destilada inserida na câmara de secagem tornou-se maior, pois esta variável passou de  $30\text{mL}/\text{min}$  para  $34\text{mL}/\text{min}$ . Ao analisar o tempo necessário para alcançar o novo regime permanente e o valor da temperatura do ar na saída do leito para a nova condição, pode-se comprovar que o aumento

da vazão de ar no processo apresentou uma influência mais significativa no tempo para que o regime permanente fosse atingido, pois usando como exemplo a curva referente a vazão de pasta de 18mL/min, obtida na vazão de ar de 1,07m<sup>3</sup>/min, a nova temperatura alcançada no regime foi de 50°C em um tempo de aproximadamente 700s. Aumentando a vazão para 1,25m<sup>3</sup>/min, a temperatura foi de 52°C em um período de aproximadamente 500s. Desta forma verifica-se que a vazão de ar influenciou mais significativamente no tempo necessário para alcançar o novo patamar, quando uma determinada vazão de pasta é inserida no equipamento para o processo de evaporação de água.

Ao analisar a influência da vazão de ar na umidade relativa do ar, comparando as figuras 4.8-b e 4.9-b, verificou-se que o aumento da vazão promoveu uma alteração na saturação do ar na saída do leito e também no tempo para alcançar o novo regime permanente. Ao observar o comportamento da curva correspondente a vazão de pasta de 22mL/min, foi comprovado que para a vazão de ar de 1,07m<sup>3</sup>/min, a saturação do ar na saída do leito foi de aproximadamente 42% em um período de 750s. O aumento da vazão de ar para 1,25m<sup>3</sup>/min, fez com que a saturação do ar na saída do leito reduzi-se para 30% e em um tempo de 550s.

Este comportamento da umidade relativa do ar diante da variável vazão de ar pode ser explicado através da equação que representa a energia térmica para sistemas com escoamento em regime estacionário, conforme é apresentado na equação 8:

$$Q = \dot{m}c_p(T_{sai} - T_{ent}) \quad (8)$$

onde  $\dot{m}$  é a vazão mássica de ar,  $c_p$  é o calor específico a pressão constante,  $T_{ent}$  e  $T_{sai}$  são as temperatura na entrada e na saída da câmara de secagem. Isto é, o aumento da vazão de ar no processo de evaporação, faz com que o transporte de energia térmica aumente, tornando maior a quantidade de energia alimentada ao equipamento. Desta forma, promove uma redução significativa no tempo necessário para alcançar o novo regime permanente e aumenta a capacidade evaporativa do leito no processo.

Conforme foi observado sobre os resultados de evaporação de água, pode-se concluir que a umidade relativa, a umidade absoluta, a temperatura do ar na saída do leito e o tempo para alcançar o regime permanente do sistema, assim que a água destilada foi inserida no leito vibrofluidizado, foram influenciados pela quantidade de pasta alimentada no equipamento, bem como, a temperatura do ar, a velocidade do ar de entrada e o diâmetro do material inerte a serem usado no processo de secagem. Porém, com relação ao diâmetro do inerte, pode-se constatar que mesmo a esfera de vidro de menor diâmetro apresentando os melhores



resultados de evaporação de água, a partir do momento que utilizou-se uma pasta real no processo, as pontes líquidas e sólidas formadas interferiram de forma significativa na circulação das esferas de vidro durante o processo, impossibilitando assim o desenvolvimento do processo de secagem. Ou seja, diante destes resultados pôde-se concluir que a seleção do tamanho do material inerte para o desenvolvimento da secagem de pasta é um fator importante, uma vez que dependendo da pasta utilizada, a força peso da partícula não irá auxiliar na taxa de atrito e na ruptura da película de pasta aderida de superfície do inerte, não desenvolvendo assim uma secagem eficiente.

A partir da análise dos resultados obtidos no processo de evaporação de água, que decidiu-se realizar os experimentos de secagem de pasta com esfera de vidro com o diâmetro de 0,00319m e os experimentos com a temperatura do ar de 100°C e vazão de ar de 1,07m<sup>3</sup>/min (1,2U<sub>mf</sub>), a fim de obter uma maior quantidade de ensaios experimentais e verificar de forma mais significativa a influência que a agitação desenvolvida no equipamento exerce no processo de secagem de uma pasta real. Visto que, a intenção do presente trabalho era ter a menor interferência possível de ar, não só na dinâmica do leito particulado como também no processo de secagem. Baseado nisso, no item a seguir serão apresentados os resultados obtidos durante o processo de secagem de leite desnatado no leito vibrofluidizado, sob diferentes condições vibracionais.

### **4.3 Secagem de pasta**

Durante o processo de secagem de pasta em qualquer leito móvel, observou-se pela análise da literatura que a vazão máxima de alimentação de pasta é influenciada pelas condições do fluido que envolve o processo, temperatura e velocidade do ar (ALMEIDA 2009; MEILI 2009; NASCIMENTO 2013; PERAZINNI 2015). No entanto, no leito vibrofluidizado, além destas variáveis a intensidade da agitação implementada ao equipamento tem mostrado que exerce influência no comportamento dinâmico do material particulado e, portanto, interfere de forma expressiva na secagem de pasta com material inerte. Desta forma, o intuito deste item consiste em verificar se a vazão máxima de alimentação que o leito consegue alcançar em regimes estáveis, apresenta alguma relação com a intensidade de vibração submetida ao leito vibrofluidizado. Além de analisar, também, a influência que a intensidade de agitação pode exercer durante os regimes permanentes e

transientes das variáveis que englobam a secagem de pasta com o auxílio de um material inerte.

#### 4.3.1 Análise fluidodinâmica

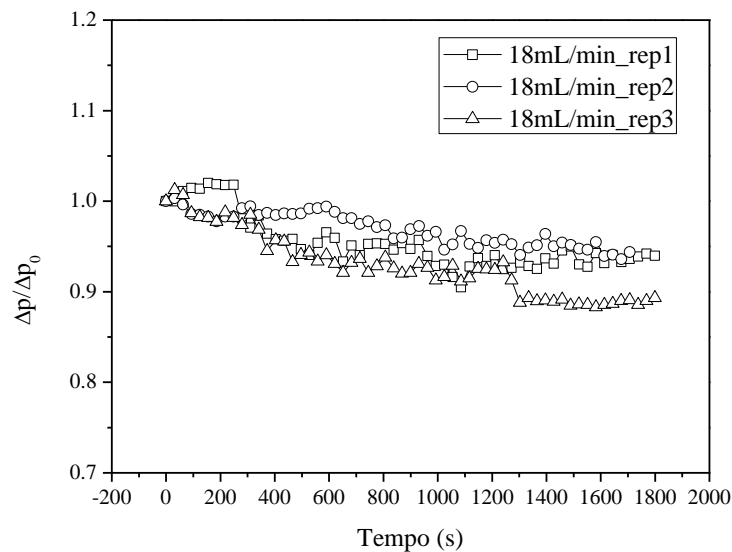
Serão analisados neste subitem o comportamento fluidodinâmico do leito particulado úmido, quando o leito vibrofluidizado foi submetido a diferentes intensidades de agitação e diferentes vazões de alimentação de pasta. Para isso foram construídas e analisadas as curvas do adimensional de queda de pressão em função do tempo, que correspondem a razão da queda de pressão total do leito nos diferentes instantes de tempo do processo pela queda de pressão no instante  $t=0$ , durante a secagem do leite desnatado.

Antes que fosse iniciado qualquer tipo de análise, foi analisada a reprodutibilidade dos dados do adimensional de queda de pressão, através de repetições realizadas dos ensaios com  $A=0,015\text{m}$  e  $f=600\text{RPM}$ , onde serão apresentados as curvas referentes a vazão de alimentação de pasta intermediária que foi de  $18\text{mL/min}$  conforme mostrado na figura 4.10. Escolheu-se esta intensidade de agitação com esta combinação de amplitude e frequência para que fossem realizadas as repetições, pois corresponde a intensidade de agitação de maior módulo trabalhada nesta tese.

Os resultados presentes na figura 4.10, mostram um comportamento esperado para este tamanho de esfera de vidro e esta intensidade de agitação, pois para as três curvas, as variações da queda de pressão foram inferiores a 10% do valor inicial. Como se trata de um material inerte que apresenta durante a fluidização a formação de pequenas bolhas, bolsões de ar e canais preferenciais, mesmo diante de qualquer intensidade de agitação, e que a vibração selecionada apresentou uma intensa movimentação das esferas de vidro, a estrutura do leito particulado durante o processo já passa a apresentar uma configuração mais heterogênea. Portanto, já era esperado que as variações da queda de pressão não fossem idênticas, mesmo realizando repetições da condição experimental. Com relação a tendência observada para as três curvas, verificou-se que a partir do momento que foi adicionado o leite desnatado por gotejamento dentro do leito vibrofluidizado, a pasta restringiu um pouco o movimento do material inerte dentro da câmara de secagem, tornando o leito particulado um pouco mais compactado. Porém, não extinguiu o desenvolvimento de pequenos caminhos preferenciais e bolhas de ar que, possivelmente facilitaram o escoamento do ar, reduzindo assim os valores

da queda de pressão durante o processo de secagem de pasta. Para os objetivos do presente trabalho, a variação do adimensional de queda de pressão apresentadas pelas três repetições foram consideradas aceitáveis, uma vez que esta intensidade de agitação correspondeu a pior situação utilizada.

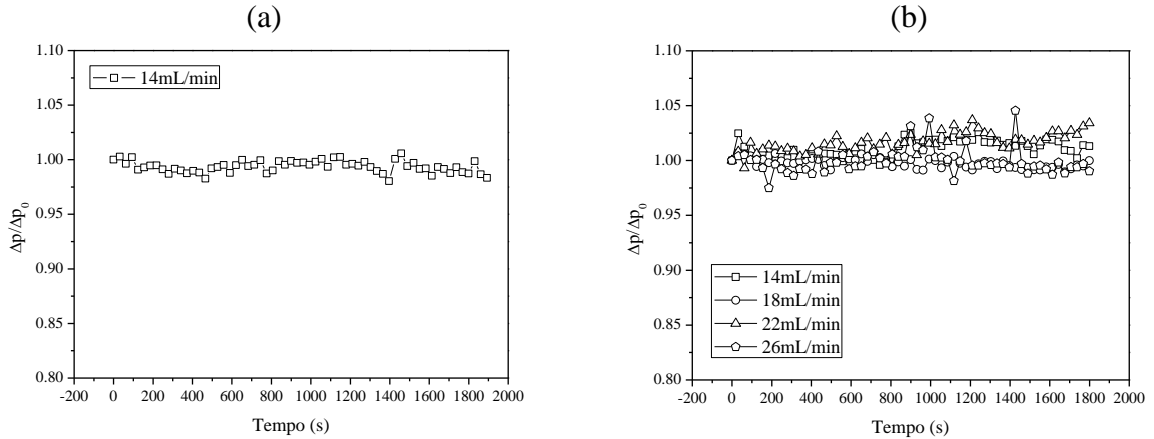
Figura 4.10: Adimensionais de queda de pressão do leito vibrofluidizado em função do tempo, na condição de  $T=100^{\circ}\text{C}$ ,  $U_s=1,2U_{mf}$  e  $\Gamma=6,04$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=600\text{RPM}$ ), parametrizado nas repetições para vazão de  $18\text{mL}/\text{min}$ .



Fonte: Acervo pessoal.

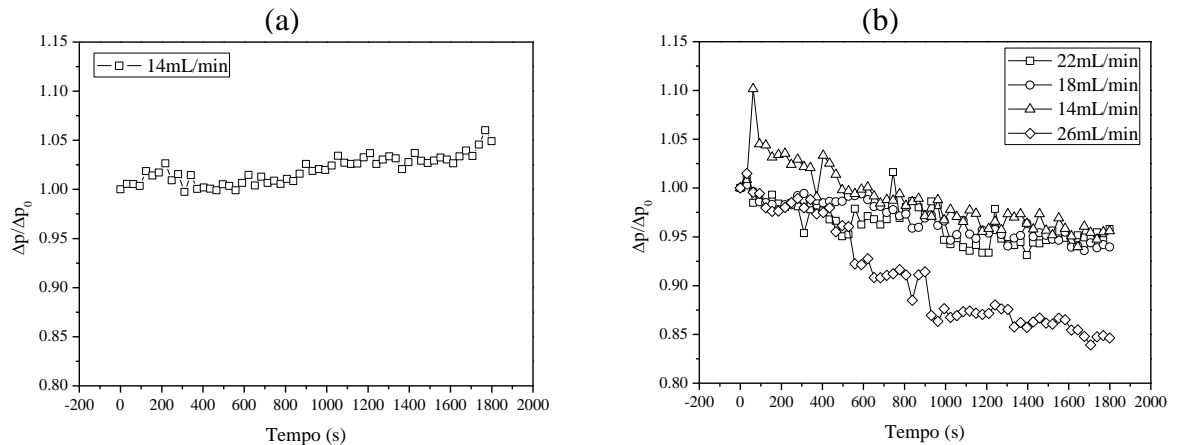
Após as análises de reprodutibilidade dos dados, resolveu-se verificar a influência que a frequência vibracional poderia exercer no comportamento dinâmico do leito particulado úmido durante o processo de secagem do leite desnatado, para isso foram apresentados na figura 4.11 e 4.12 os adimensionais de queda de pressão em função do tempo, obtidos durante a secagem do leite desnatado em leito vibrofluidizado operando com  $\Gamma=0,53$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=400\text{RPM}$ ) e  $\Gamma=4,06$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=1100\text{RPM}$ ), e  $\Gamma=0,148$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=100\text{RPM}$ ) e  $\Gamma=6,04$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $600\text{RPM}$ ), ou seja, condições extremas de agitação para as amplitudes de  $0,003\text{m}$  e  $0,015\text{m}$ , respectivamente.

Figura 4.11: Adimensionais de queda de pressão do leito vibrofluidizado em função do tempo, na condição de  $T=100^{\circ}\text{C}$ ,  $U_s=1,2U_{mf}$  e  $\Gamma=0,53$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=400\text{RPM}$ ) (a) e com  $\Gamma=4,06$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=1100\text{RPM}$ ) (b), ambos os gráficos parametrizados na vazão de leite desnatado.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4.12: Adimensionais de queda de pressão do leito vibrofluidizado em função do tempo, na condição de  $T=100^{\circ}\text{C}$ ,  $U_s=1,2U_{mf}$  e  $\Gamma=0,148$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=100\text{RPM}$ ) (a) e com  $\Gamma=6,04$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=600\text{RPM}$ ) (b), ambos os gráficos parametrizados na vazão de leite desnatado.



Fonte: Acervo pessoal.

Ao analisar os gráficos presentes nas figuras 4.11 e 4.12, foi observado para os dois sistemas que o aumento da frequência vibracional aumentou a vazão máxima de pasta inserida no leito vibrofluidizado. Pois para a amplitude de 0,003m quando a frequência foi igual a 400RPM, a vazão máxima de alimentação do leite desnatado foi igual a 14mL/min. Quando aumentou-se a frequência para 1100RPM, a vazão máxima foi igual a 26mL/min. Para o

sistema que teve uma intensidade de agitação com amplitude igual a 0,015m, quando a frequência foi igual a 100RPM a única vazão de pasta alcançada no sistema foi 14mL/min. Ao aumentar a frequência vibracional para 600RPM, a vazão máxima alcançada no sistema também foi igual a 26mL/min.

Estes resultados obtidos para as duas amplitudes, podem estar relacionado com a movimentação das esferas de vidro dentro da câmara de secagem, pois a mesma foi ficando mais intensa com o aumento da frequência vibracional, proporcionando maior quantidade de movimento das partículas e aumentando assim o número de colisões entre as partículas e partículas-parede. Além de contribuir com o escoamento do ar entre o material particulado, facilitando a secagem da película de pasta aderida na superfície da esfera de vidro. Estes fatores favoreceram ao equipamento um potencial em realizar a ruptura das pontes líquidas e sólidas desenvolvidas durante a secagem do leite desnatado, possibilitando o uso de maiores vazões de pasta inseridas no leito durante o processo de secagem, para as maiores frequências vibracionais.

Examinando os gráficos separadamente, na figura 4.11-a pôde-se verificar que a variação da queda de pressão foi pequena, pois a variação dos valores obtidos desta variável durante todo o processo de secagem foram inferiores a 2,0%. Com base nesta curva de adimensional de queda de pressão, pode-se considerar que a inserção do leite desnatado no equipamento com  $\Gamma=0,53$  ( $A=0,003m$  e  $f=400RPM$ ), fez com que o material particulado ficasse mais compactado, reduzindo assim a formação de bolhas que surgiram durante a fluidização deste tamanho de esfera de vidro. Como se trata de uma agitação bem mais branda, pode-se considerar que tal fator possibilitou o desenvolvimento de um leito particulado com uma configuração mais homogênea e constante.

Quando aumentou-se a frequência vibracional (figura 4.11-b) pode-se verificar que a agitação com esta amplitude não proporcionou uma maior variação da queda de pressão durante o processo de secagem. Neste caso, para a vazão de 14mL/min, à medida que o leite desnatado era inserido no equipamento, a variação da queda de pressão também foi pequena, com valores que ficaram em torno de 2,5% do valor inicial. Assim que aumentou-se a vazão de alimentação de pasta para 26mL/min, verificou-se que os valores desta variável foram mais constantes, pois a variação da queda de pressão ficaram em torno do valor obtido no início do processo. Logo, pode-se considerar que para esta vazão de alimentação, as pontes sólidas e líquidas formadas no interior das esferas de vidro, deixaram o leito particulado mais

estruturado e estável, fazendo com que a variação da queda de pressão ficasse constante durante o processo de secagem do leite desnatado.

Ao analisar os resultados obtidos quando a agitação teve a amplitude de 0,015m, figura 4.12-a, verificou-se que a variação da queda de pressão foi em torno de 5% em relação ao valor inicial. No entanto, os valores desta variável foram um pouco maiores que o valor obtido no instante inicial.

Assim que a intensidade de agitação foi aumentada dentro do leito, com o aumento da frequência, conforme mostrado na figura 4.12-b, verificou-se que a queda de pressão obtida para as quatro vazões de alimentação não tiveram uma variação significativa da queda de pressão, ficando, de um modo geral, estes valores em torno de 10% do valor inicial. Porém, à medida que aumentava a quantidade de pasta no interior do leito com o tempo, os valores da queda de pressão foram mudando para as diferentes vazões de pasta. Na vazão de pasta de 14mL/min, verificou-se que a variação da queda de pressão foi mais significativa nos primeiros 400 segundos do processo de secagem em que os valores de queda de pressão foram 10% maiores que o valor inicial. A partir dos 400s, a queda de pressão começou a sofrer uma redução mais expressiva, chegando a valores 5% menores do que o obtido no instante inicial. Assim que aumentou-se a vazão de pasta para 26mL/min, verificou-se que a variação de queda de pressão teve uma redução durante o processo de secagem de pasta, pois seus valores foram 15% menores que o valor obtido no início do processo. Esta redução dos valores de queda de pressão não foram unicamente decorrente da intensa movimentação do leito, devido a esta intensidade de agitação, mas foi decorrente de um canal preferencial produzido durante o processo, que fez com que o ar fosse canalizado e a queda de pressão com o transcorrer da secagem fosse menor do que obtido no instante  $t=0$ . Na figura 4.13 foi mostrado o canal preferencial produzido durante o processo de secagem do leite desnatado com vazão de 26mL/min.

Figura 4.13: Foto do canal preferencial desenvolvido durante o processo de secagem de pasta com vazão de 26mL/min, quando o leito vibrofluidizado foi submetido a agitação com  $A=0,015\text{m}$  e  $f=600\text{RPM}$ .



Fonte: Acervo pessoal.

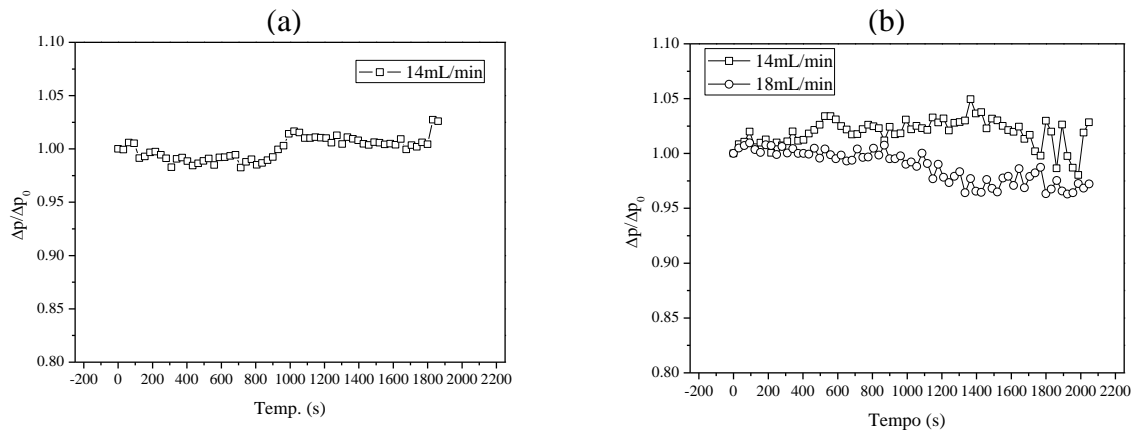
Mesmo diante dos acontecimentos que ocasionaram, por exemplo, a formação de canais preferenciais conforme mostrado na figura 4.13, os resultados obtidos para o leito com pastas mostrou um comportamento aproximado ao leito seco. Para a baixa amplitude o leito particulado, de um modo geral, apresentou uma pequena compactação para as frequências utilizadas. Na maior amplitude foi observado uma movimentação das esferas de vidro mais intensa dentro da câmara de secagem, à medida que aumentou-se a frequência, ocasionando assim a expansão do leito. O comportamento típico para a baixa amplitude e para alta amplitude, compactação e expansão, são as principais responsáveis pela variação da queda de pressão total no processo de secagem.

Diante das duas figuras apresentadas, 4.11 e 4.12, foi possível verificar que os dois parâmetros que caracterizam a vibração no leito vibrofluidizado, influenciaram de maneira distinta na dinâmica das esferas de vidro úmidas, durante o processo de secagem do leite desnatado. Com relação ao aumento da frequência vibracional no sistema, constatou-se que este parâmetro não influenciou significativamente na variação dos valores da queda de pressão dentro do leito, pois as variações desta variável foram muito semelhantes nas duas situações apresentadas para cada amplitude de agitação. O parâmetro vibracional amplitude já interferiu de forma considerável na variação de queda de pressão, pois quando aumentou-se este parâmetro a força exercida pelo equipamento sobre as esferas de vidro também aumentou e, por consequência, o deslocamento do material particulado tornou-se maior dentro do

equipamento. Logo, a configuração do meio particulado quando o leito foi submetido a uma agitação com amplitude de 0,015m foi mais heterogêneo, o que causou uma maior variação da queda de pressão dentro do leito durante o processo, quando comparado com os valores obtidos para a amplitude de 0,003m.

Como neste trabalho os experimentos de secagem de pasta foram desenvolvidos com um maior número de frequências, quando comparado com dados de Meili (2009), possibilitou realizar uma análise dos ensaios que tiveram os valores de  $\Gamma$  constantes ou quase constantes, para isso foram selecionados os valores de amplitude de 0,003m e 0,015m combinadas a diferentes valores de frequência que proporcionaram os valores do número adimensional de vibração de 0,5; 1,5; 2,7 e 4 respectivamente. Desta forma serão mostrados na figura 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17, as curvas dos adimensionais de queda de pressão em função do tempo, parametrizadas na vazão de pasta inserida no leito vibrofluidizado, obtidas para as diferentes combinações de amplitude e frequência.

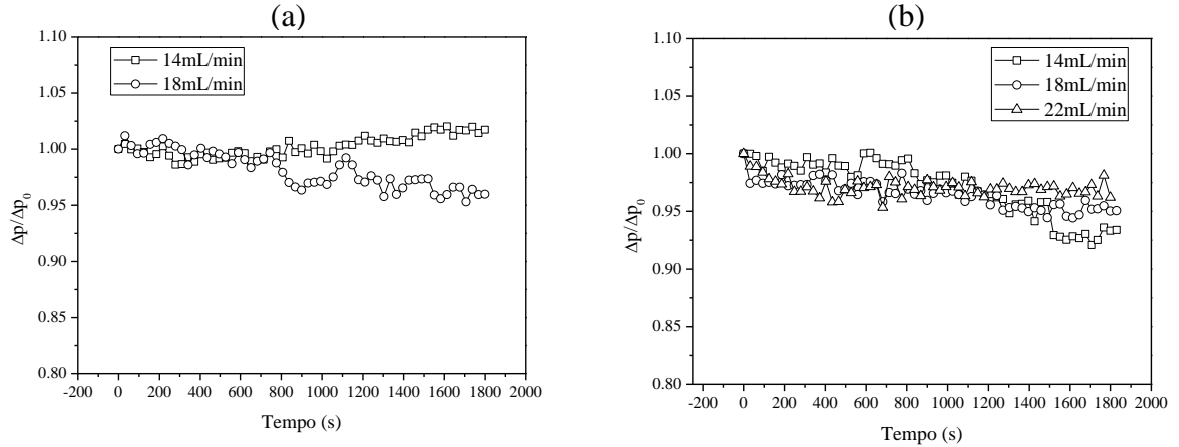
Figura 4.14: Adimensionais de queda de pressão do leito vibrofluidizado em função do tempo, na condição de  $T=100^{\circ}\text{C}$ ,  $U_s=1,2U_{mf}$  e  $\Gamma=0,53$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=400\text{RPM}$ ) (a) e com  $\Gamma=0,65$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=200\text{RPM}$ ) (b), ambos os gráficos parametrizados na vazão de leite desnatado.



Fonte: Acervo pessoal.



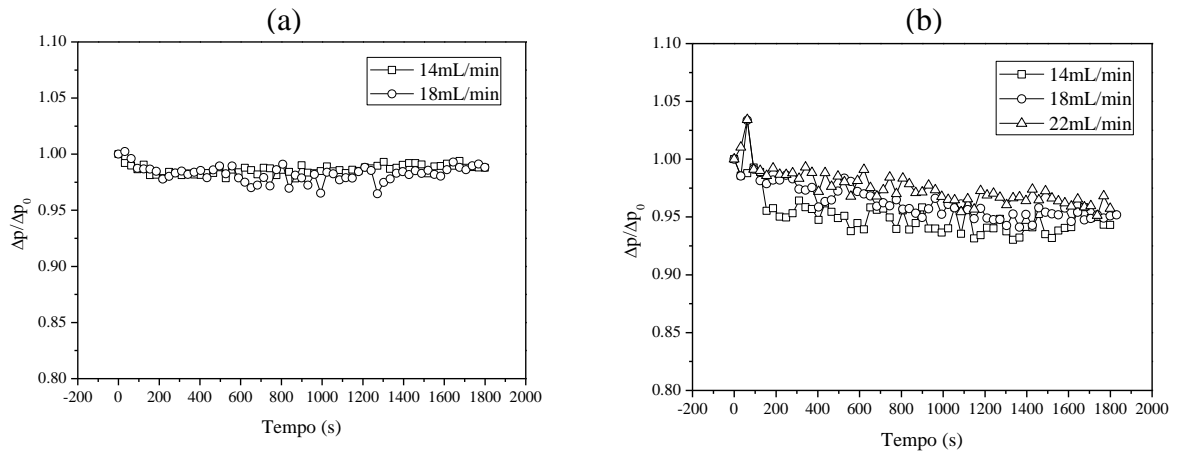
Figura 4.15: Adimensionais de queda de pressão do leito vibrofluidizado em função do tempo, na condição de  $T=100^{\circ}\text{C}$ ,  $U_s=1,2U_{mf}$  e  $\Gamma=1,65$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=700\text{RPM}$ ) (a) e com  $\Gamma=1,48$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=300\text{RPM}$ ) (b), ambos os gráficos parametrizados na vazão de leite desnatado.



Fonte: Acervo pessoal.

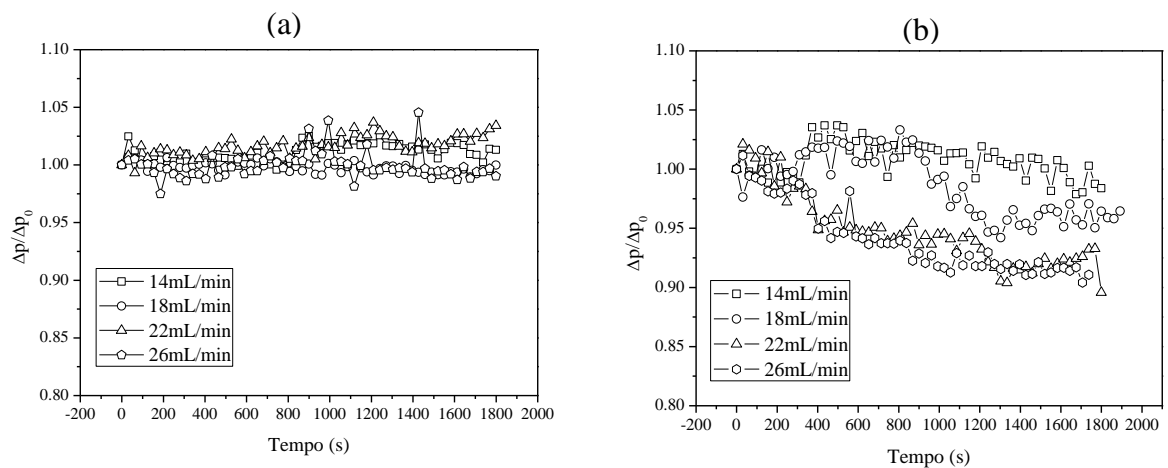
Antes de analisar o comportamento do adimensional de queda de pressão durante a secagem de pasta quando o equipamento foi submetido a duas combinações de amplitude e frequência distintas, primeiramente, verificou-se que para os números adimensionais de vibração menores e iguais a 2,7, conforme mostrado nas figuras 4.14, 4.15, 4.16, pôde-se trabalhar com maiores vazões de pasta inseridas no leito vibrofluidizado, quando a agitação do sistema teve amplitude de 0,015m. No momento que o equipamento foi submetido a uma intensidade de agitação maior,  $\Gamma$  com valores próximos de 4, constatou-se na figura 4.17 que uma mesma vazão de pasta foi alcançada para as duas amplitudes utilizadas. Logo pode-se considerar que quando o leito vibrofluidizado foi submetido a agitações um pouco mais brandas, a amplitude passou a exercer maior influência no processo de secagem de pasta.

Figura 4.16: Adimensionais de queda de pressão do leito vibrofluidizado em função do tempo, na condição de  $T=100^{\circ}\text{C}$ ,  $U_s=1,2U_{mf}$  e  $\Gamma=2,7$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=900\text{RPM}$ ) (a) e com  $\Gamma=2,69$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=400\text{RPM}$ ) (b), ambos os gráficos parametrizados na vazão de leite desnatado.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4.17: Adimensionais de queda de pressão do leito vibrofluidizado em função do tempo, na condição de  $T=100^{\circ}\text{C}$ ,  $U_s=1,2U_{mf}$  e  $\Gamma=4,2$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=500\text{RPM}$ ) (a) e com  $\Gamma=4,06$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=1100\text{RPM}$ ) (b), ambos os gráficos parametrizados na vazão de leite desnatado.



Fonte: Acervo pessoal.

Outro comportamento constatado nas figuras apresentadas, corresponde a dependência dos valores de  $\Delta p_t/\Delta p_{t=0}$  com a quantidade de pasta inserida no leito vibrofluidizado, uma vez que a variação da queda de pressão durante o processo de secagem diminuiu, à medida que aumentou a vazão de pasta inserida no mesmo. Ou seja, com o transcorrer da secagem de pasta, as maiores vazões de alimentação apresentaram os valores da queda de pressão muito

semelhantes e os adimensionais de queda de pressão ficaram variando em torno de 1. Este comportamento da queda de pressão pode ser explicado conforme observado por Santana et al., (1997) para o leito de jorro. Pois segundo os autores, o aumento da vazão de pasta durante o processo de secagem, torna a película que envolve o material particulado mais espessa e, por consequência, cria pontes líquidas mais fortes que promovem a redução da circulação das esferas de vidro dentro do leito. Logo, pode-se considerar que as altas vazões de pasta inseridas no leito vibrofluidizado, desenvolveram pontes líquidas mais fortes nos interstícios do leito de esferas de vidro que, além de diminuir a circulação do inerte dentro da câmara de secagem, também desenvolveram uma estrutura de meio particulado mais homogênea, que obtiveram valores de queda de pressão bem semelhantes durante o processo de secagem do leite desnatado.

Com relação a variação da queda de pressão, verificou-se que quando diferentes combinações de amplitude e frequência foram implementadas no leito vibrofluidizado, diferentes comportamento dinâmicos foram observados durante o processo. De um modo geral, pode-se constatar que quando a secagem de pasta foi realizada com a agitação em que a amplitude foi igual a 0,003m, os  $\Delta p_t / \Delta p_{t=0}$  variaram em torno de 2,5% do valor inicial. Para os ensaios realizados com amplitude de 0,015m, a variação da queda de pressão foi maior e ficou em torno de 5% do valor inicial obtido no processo. Estes resultados confirmam o que foi observado no comportamento fluidodinâmico das esferas de vidro com o diâmetro de 0,00319m, pois quando o leito particulado foi submetido a uma agitação que tinha a maior amplitude, 0,015m, as curvas características do leito vibrofluidizado apresentaram os maiores desvios padrões de queda de pressão, comparado com os valores dos desvios obtidos para a amplitude de 0,003m. Devendo lembrar que as oscilações da queda de pressão não estão referentes unicamente à intensa movimentação das esferas de vidro dentro do leito, mas também devido à formação de bolhas e bolsões do ar que acabaram influenciando na configuração do leito, o deixando mais heterogêneo e auxiliando na flutuação da queda de pressão durante o processo.

No entanto, foram observadas condições experimentais que tiveram uma redução da queda de pressão com o transcorrer do processo, que foram superiores a 5% do valor inicial. Estas condições referem-se as vazões de 26mL/min para  $\Gamma=6,04$  ( $A=0,015m$  e  $f=600RPM$ ) e 26mL/min e 22mL/min para  $\Gamma=4,2$  ( $A=0,015m$  e  $f=500RPM$ ), presentes nas figuras 4.12-b e 4.17-b respectivamente. Diante do que foi visualizado durante os experimentos, nestas duas situações os leitos particulados foram submetidos a intensas agitações e, como a esfera de

vidro utilizada pertence ao grupo D de Geldart, não apresentaram uma fluidização homogênea durante o processo. Logo, quando as partículas foram impulsionadas por um sistema mecânico com vibração de amplitude de 0,015m, houve uma intensa movimentação das mesmas dentro da câmara de secagem e muitos choques, entre partícula-partícula e partícula-parede. Tais fatores, juntamente com a presença da pasta, promoveram uma configuração do meio particulado heterogênea que ocasionou em maiores variações da queda de pressão no leito durante a secagem.

Com relação a influência da frequência no processo de secagem, verificou-se que este parâmetro vibracional não influenciou de forma expressiva no comportamento dinâmico. Porém, sua interferência correspondeu ao aumento das vazões de pasta, uma vez que nas maiores frequências vibracionais, foram alcançadas as maiores vazões de pastas no sistema fluido-pasta-partícula.

De um modo geral verificou-se que os resultados encontrados continuam evidenciando que o número adimensional de vibração não deve ser usado como parâmetro universal, diante dos comportamentos distintos que  $\Gamma$  com valores muito próximos mostraram. Sugerindo-se sempre que deve ser informada a amplitude e a frequência vibracional que representam o número adimensional de vibração.

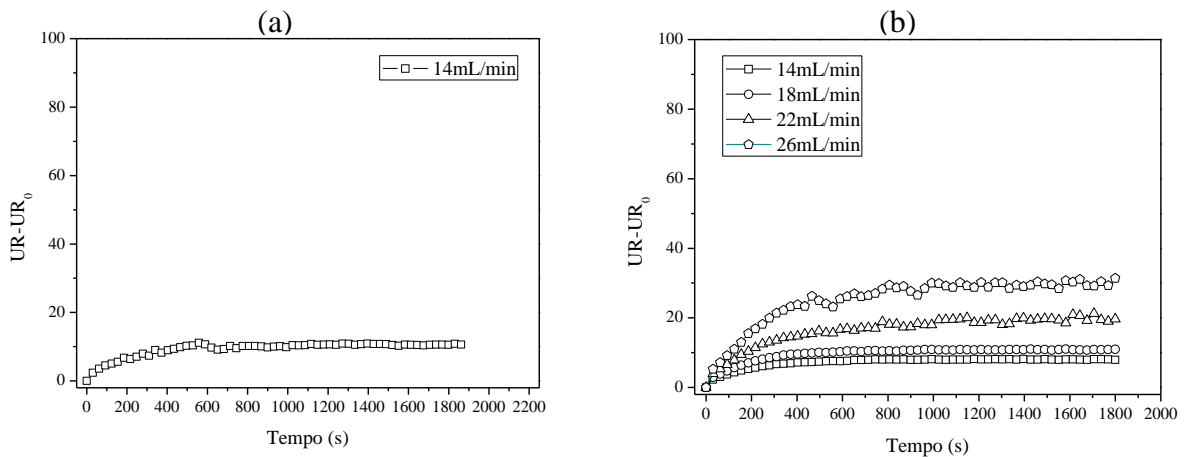
#### **4.3.2 Análise da Umidade Relativa**

Neste item serão apresentados os dados de umidade relativa do ar na saída do leito vibrofluidizado, obtidas para as diferentes vazões de alimentação de pasta e diferentes condições vibracionais. Para a construção destes gráficos, os valores obtidos desta variável no transcorrer do processo de secagem foram subtraídos pelo valor da umidade relativa no instante  $t=0$ , para que fosse eliminada qualquer interferência climática dos ensaios experimentais. Assim, quando forem mencionados no texto o termo umidade relativa, estará sendo referido a subtração  $UR-UR_0$ .

Visto que os comportamentos das curvas foram semelhantes para todas as condições, serão apresentadas apenas as curvas referentes ao processo de secagem de pasta que correspondem às condições extremas de cada amplitude, frequência de 400RPM e 1100RPM para a amplitude de 0,003m e frequência de 100RPM e 600RPM para a amplitude de 0,015m.

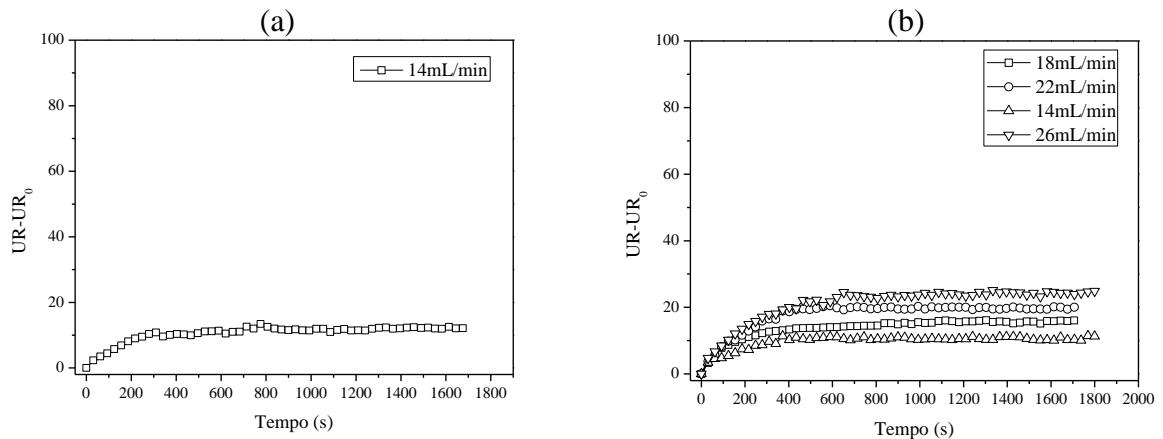
Nas figuras 4.18 e 4.19 serão mostrados os dados obtidos da umidade relativa do ar em função do tempo, para os experimentos realizados da secagem do leite desnatado, quando o leito vibrofluidizado foi submetido a vibração com amplitude de 0,003m combinada com as frequências de 400RPM e 1100RPM, e amplitude de 0,015m combinada com as frequências de 100RPM e 600RPM, respectivamente. Todos os gráficos mostrados nas figuras foram parametrizados na vazão de alimentação de leite desnatado.

Figura 4.18: Umidade relativa do ar na saída do leito vibrofluidizado quando submetido a agitação com  $\Gamma=0,53$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=400\text{RPM}$ ) (a) e  $\Gamma=4,06$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=1100\text{RPM}$ ) (b) para a condição de  $T=100^\circ\text{C}$  e  $U_s=1,20U_{mf}$ , ambos os gráficos parametrizados na vazão do leite desnatado.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4.19: Umidade relativa do ar na saída do leito vibrofluidizado quando submetido a agitação com  $\Gamma=0,148$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=100\text{RPM}$ ) (a) e  $\Gamma=6,04$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=600\text{RPM}$ ) (b), para a condição de  $T=100^\circ\text{C}$  e  $U_s=1,20U_{mf}$ , ambos os gráficos parametrizados para a vazão de leite desnatado.



Fonte: Acervo pessoal.

Ao analisar o comportamento da umidade relativa do ar na saída do leite, conforme os resultados encontrados nas figuras 4.18-a, 4.18-b, 4.19-a e 4.19-b verificou-se que à medida que o leite desnatado foi inserido na câmara de secagem, a saturação do ar aumentou até atingir um novo valor limite em que não variou com o tempo. Além de mostrar que a umidade relativa do ar e o tempo para alcançar este novo regime são dependentes da vazão de alimentação de pasta no leite, pois o aumento da vazão promoveu um aumento da saturação do ar no processo e, também, do tempo para que fosse alcançado este novo regime.

Estes resultados obtidos nos experimentos mostraram que assim que a pasta foi inserida no equipamento, passou a existir a transferência de massa na forma de água evaporada presente no leite desnatado para a corrente gasosa, até que fosse alcançado o estado estacionário da umidade relativa do ar na saída do leite. Entretanto, quando foi realizada a comparação das curvas de uma mesma vazão de pasta e diferentes intensidades de agitação, foi verificado a influência da frequência vibracional no processo de secagem. Pois, ao analisar as curvas correspondentes a vazão de alimentação de 14mL/min, presentes nas figuras 4.18-a e 4.18-b, foi constatado que o aumento da frequência para a amplitude de 0,003m influenciou na saturação do ar alcançada pelo sistema e também no tempo para que o novo regime fosse atingido, uma vez que, para os ensaios referentes a frequência de 400RPM a umidade relativa do ar na saída do leite foi de aproximadamente 11%. Quando aumentou-se a frequência vibracional para 1100 RPM, verificou-se que a saturação do ar alcançada por esta vazão de pasta ficou em torno de 8%.

Ao analisar os resultados obtidos para a vazão de 14mL/min, quando o leite vibrofluidizado foi submetido a diferentes agitações, porém com a amplitude de 0,015m, verificou-se também que o aumento da frequência vibracional também influenciou no processo de secagem de pasta, pois para a frequência de 100RPM, a saturação do ar foi de 12,5% e foi alcançada em torno de 500 segundos. Ao aumentar a frequência vibracional para 600RPM, a saturação do ar para a mesma vazão foi de 10% e o tempo para que fosse alcançado o novo regime foi de 400 segundos.

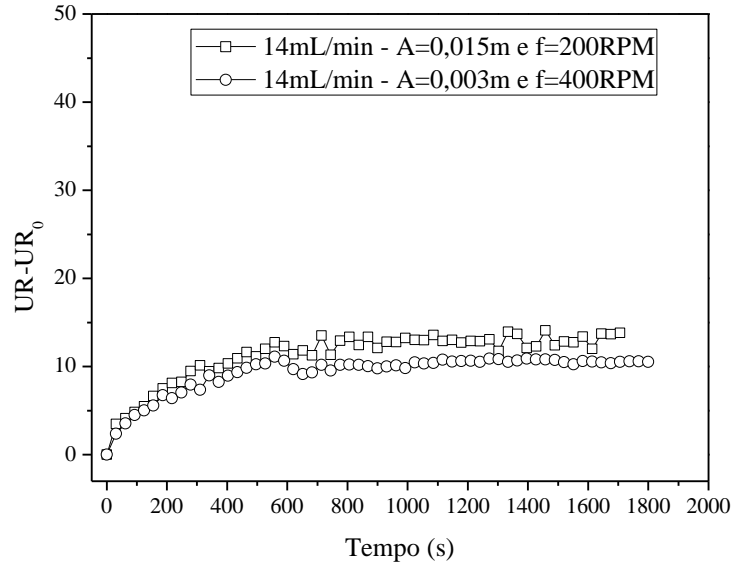
Desta forma, pode-se constatar que o aumento da frequência vibracional para as duas amplitudes utilizadas tornou maior a circulação das esferas de vidro dentro da câmara de secagem e esta movimentação do material inerte, além de aumentar o número de colisões entre as esferas de vidro dentro da câmara de secagem, também facilitou o escoamento do ar aquecido através do meio particulado.

Visto que o aumento da frequência influenciou nos fenômenos de transferência de calor e massa presentes na secagem do leite desnatado, para as duas amplitudes trabalhadas, optou-se em apresentar nas figuras 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23 um comparativo entre as umidades relativas do ar na saída do leito, quando o mesmo foi submetido a diferentes combinações de amplitude e frequência, no entanto, que apresentaram valores de  $\Gamma$  iguais ou muito próximos. Na figura 4.20, serão apresentadas as curvas de umidade relativa do ar na saída do leito em função do tempo de processo, quando a agitação implementada no equipamento correspondeu aos valores de  $\Gamma$  mais próximos de 0,5. Como nesta condição vibracional apenas a vazão de 14mL/min foi obtidas nas duas combinações de amplitude e frequência, logo nesta figura serão apresentados os resultados obtidos da umidade relativa do ar para esta vazão de pasta, porém para a vibração com as seguintes combinações,  $A=0,003m$  e  $f=400RPM$  e  $A=0,015m$  e  $f=200RPM$ .

Nota-se, através dos gráficos da figura 4.20, que as curvas de umidade relativa do ar na saída do leito para as duas combinações de amplitude e frequência ficaram bem próximas, mostrando que para esta intensidade de agitação e este tamanho de esfera de vidro, a variação destas curvas encontraram-se dentro da faixa do erro experimental.

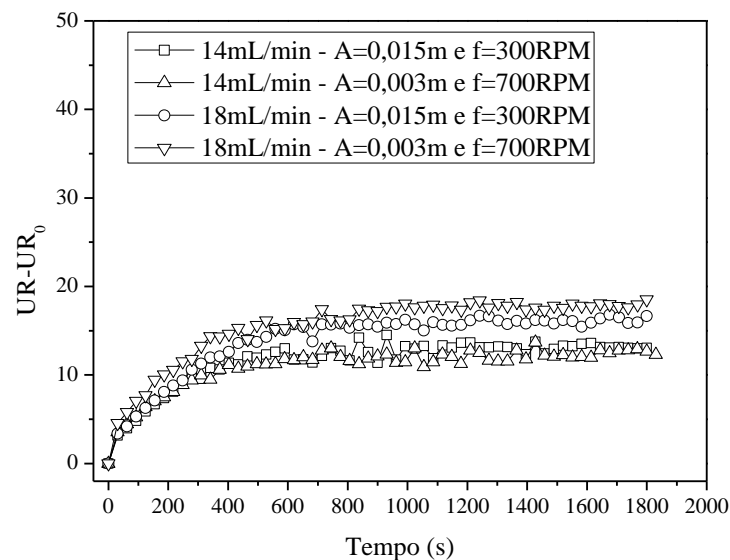
Na figura 4.21 são mostradas as curvas da umidade relativa do ar na saída do leito em função do tempo, para os ensaios realizados a vazão de 14mL/min e de 18mL/min, quando o leito vibrofluidizado foi submetido a  $A=0,003m$  e  $f=700RPM$  e  $A=0,015m$  e  $f=300RPM$ , que resultaram em  $\Gamma$  com valores em torno de 1,5. A partir desta figura pode-se verificar que ao aumentar a intensidade de agitação, as duas combinações de amplitude e frequência continuaram a não exercer influência no processo de secagem de pasta, uma vez que o comportamento foi semelhante ao obtido para  $\Gamma=0,5$ . Logo, pode-se considerar também para esta intensidade de agitação, que as curvas da umidade relativa para as duas vazões de pasta e diferentes valores de  $A$  e  $f$ , também ficaram dentro da faixa de erro experimental.

Figura 4.20: Umidade relativa do ar na saída do leito vibrofluidizado quando submetido a agitação com  $\Gamma=0,53$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=400\text{RPM}$ ) e  $\Gamma=0,65$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=200\text{RPM}$ ) para a vazão de  $14\text{mL}/\text{min}$ ,  $T=100^\circ\text{C}$  e  $U_s=1,20U_{mf}$ .



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4.21: Umidade relativa do ar na saída do leito vibrofluidizado quando submetido a agitação com  $\Gamma=1,65$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=700\text{RPM}$ ) e  $\Gamma=1,48$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=300\text{RPM}$ ) para a vazão de  $14\text{mL}/\text{min}$  e  $18\text{mL}/\text{min}$ ,  $T=100^\circ\text{C}$  e  $U_s=1,20U_{mf}$ .



Fonte: Acervo pessoal.

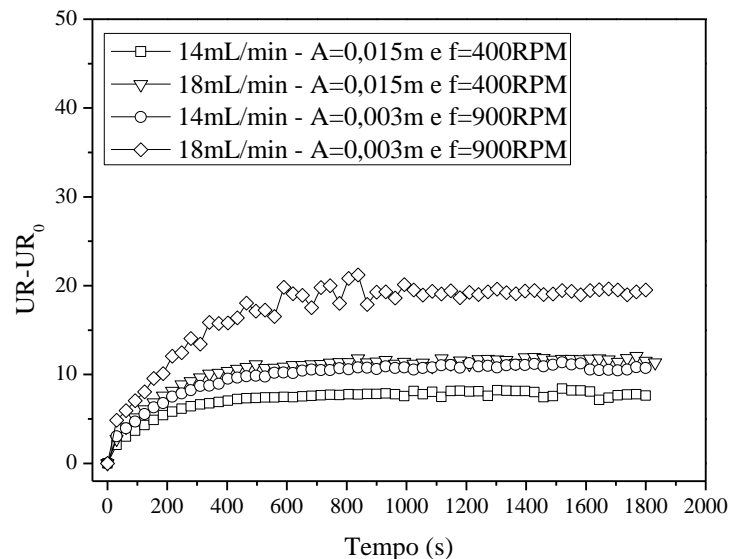
Nas figuras 4.22 e 4.23 serão apresentadas as curvas de umidade relativa do ar na saída o leito, referentes aos ensaios realizados com as diferentes combinações de amplitude e



frequência que resultaram em valores de  $\Gamma$  que ficaram em torno de 2,7 e 4, respectivamente. A figura 4.22 mostra os resultados obtidos para as vazões de pasta presentes nos dois sistemas de agitação, 14mL/min e 18mL/min. Como nos sistemas em que o número adimensional de vibração ficaram próximos de 4, apresentaram a mesma quantidade de vazões de pasta trabalhadas, decidiu-se então apresentar na figura 4.23 apenas os resultados obtidos para duas vazões de pasta, 18mL/min e 26mL/min.

A partir destas figuras, de um modo geral, pode-se constatar que ao aumentar os valores do número adimensional de vibração para valores maiores ou iguais a 2,7, foi observado que as curvas da umidade relativa começaram a apresentar uma distinção entre os resultados obtidos para a amplitude de 0,003m e 0,015m, pois os valores obtidos desta variável ficaram muito longe do que se espera de um erro experimental. A única condição que não apresentou tal comportamento foi a vazão de 18mL/min apresentada na figura 4.23, mostrando que como se trata de uma alta intensidade de agitação, as diferentes combinações de A e f não exerceram influência no processo e ficaram dentro do erro experimental.

Figura 4.22: Umidade relativa do ar na saída do leito vibrofluidizado quando submetido a agitação com  $\Gamma=2,7$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=900\text{RPM}$ ) e  $\Gamma=2,69$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=400\text{RPM}$ ) para as vazões de 14mL/min e 18mL/min,  $T=100^\circ\text{C}$  e  $U_s=1,20U_{mf}$ .

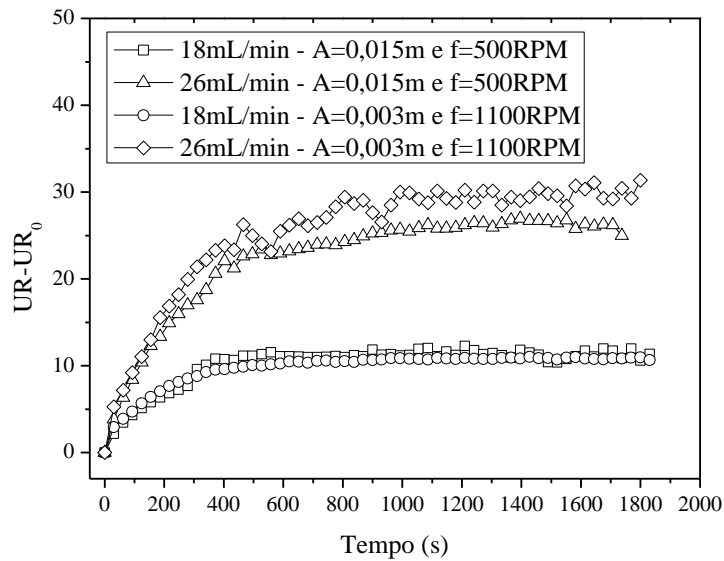


Fonte: Acervo pessoal.

De acordo com o que foi mostrado nas figuras, 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23, pode-se considerar, de uma forma generalizada, que ao aumentar a intensidade de agitação para valores de  $\Gamma$  maiores ou iguais a 2,7, as diferentes combinações de amplitude e frequência

passaram a exercer influência no processo de secagem de pasta, pois foi verificado que quando o leito vibrofluidizado foi submetido a amplitude de 0,015m, houve um aumento da capacidade evaporativa do mesmo em realizar a secagem do leite desnatado e as curvas da umidade relativa ficaram em patamares inferiores ao obtido para as curvas referentes aos ensaios realizados a amplitude de 0,003m.

Figura 4.23: Umidade relativa do ar na saída do leito vibrofluidizado quando submetido a agitação com  $\Gamma=4,06$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=1100\text{RPM}$ ) e  $\Gamma=4,2$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=500\text{RPM}$ ) para as vazões de 18mL/min e 26mL/min;  $T=100^\circ\text{C}$  e  $U_s=1,20U_{mf}$ .



Fonte: Acervo pessoal.

Diante das observações e constatações comentadas neste item, ficou nítido a interferência que as diferentes intensidades de agitação e a quantidade de pasta exercem na circulação das esferas de vidro e, por consequência, nos fenômenos de transferência de calor e massa que envolvem o processo de secagem de pasta com o auxílio de inerte. Além de ficar, mais uma vez, evidente que um mesmo número adimensional de vibração pode obter diferentes patamares de saturação do ar na saída do leito, confirmando o que vem sendo mencionado por Daleffe (2005) e Meili (2009), que um mesmo número adimensional de vibração pode apresentar comportamentos fluidodinâmicos distintos e desta forma interferir de maneiras diferentes no processo de secagem em leito vibrofluidizado.

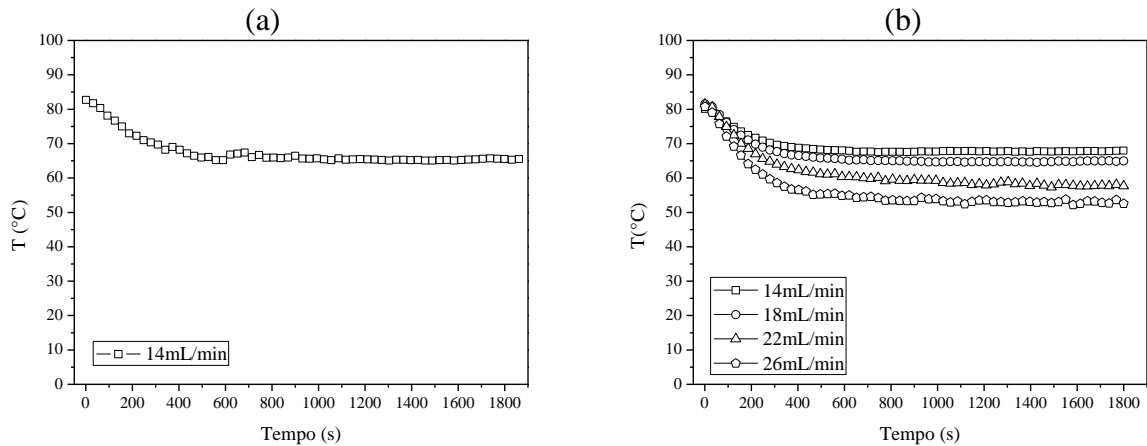
### 4.3.3 Análise da temperatura do ar na saída do leito

Assim como foi visto no subitem anterior sobre a variação da umidade do ar na saída do equipamento, mostrando que a água presente na pasta foi evaporada durante o processo, a temperatura do ar também sofreu a interferência deste vapor de água que passa a estar presente na corrente de ar que sai do leito vibrofluidizado. Neste subitem, então, serão mostrados o comportamento da temperatura do ar na saída do leito, durante a secagem de pasta, quando foram realizadas modificações na intensidade de agitação e na vazão de alimentação de pasta no equipamento.

Primeiramente serão apresentados nas figuras 4.24 e 4.25 os resultados obtidos da temperatura do ar na saída do leito, quando o leito vibrofluidizado foi submetido a intensidades de agitação diferentes, porém que correspondessem a mesma amplitude, a fim de verificar a influência que a frequência vibracional exerceu nos fenômenos de transferência de calor durante o processo de secagem do leite desnatado. Nestas duas figuras serão mostradas as curvas de temperatura do ar na saída do equipamento em função do tempo de processo, referentes aos ensaios realizados com amplitude de 0,003m combinada as frequências de 400RPM e 1100RPM e aos ensaios realizados com amplitude de 0,015m combinada as frequências de 100RPM e 600RPM.

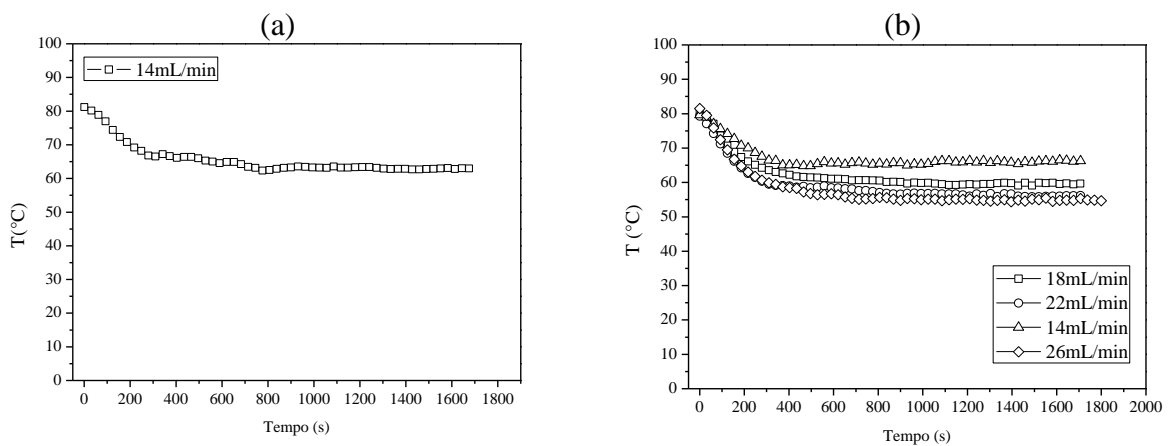
Os valores da temperatura do ar na saída do leito estão diretamente vinculados com a saturação alcançada do ar quando uma determinada vazão de pasta foi inserida no leito vibrofluidizado. Logo, conforme foi mostrado nas figuras 4.24 e 4.25, as curvas da temperatura do ar na saída do leito em função do tempo de processo tiveram o comportamento esperado, pois à medida que a pasta foi inserida no equipamento, a saturação do ar foi aumentando com o tempo e a temperatura do mesmo teve seu valor reduzido até alcançar novo patamar, em que as temperaturas na saída do leito não variassem mais com o tempo. Assim que aumentou a vazão de pasta, conforme foi observado nas figuras 4.24-b e 4.25-b, uma maior saturação do ar na saída do leito foi alcançada no sistema e, por consequência, menor patamar de temperatura do ar foi obtido durante o processo de secagem de leite desnatado.

Figura 4.24: Temperatura do ar na saída do leito vibrofluidizado quando o processo de secagem foi realizado a  $T=100^{\circ}\text{C}$ ,  $U_s=1,2U_{mf}$  e agitação de  $\Gamma=0,53$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=400\text{RPM}$ ) (a) e  $\Gamma=4,06$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=1100\text{RPM}$ ) (b), ambos os gráficos parametrizados na vazão do leite desnatado.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4.25: Temperatura do ar na saída do leito vibrofluidizado quando o processo de secagem foi realizado a  $T=100^{\circ}\text{C}$ ,  $U_s=1,2U_{mf}$  e agitação de  $\Gamma=0,148$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=100\text{RPM}$ ) (a) e  $\Gamma=6,0$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=600\text{RPM}$ ) (b), ambos os gráficos parametrizados na vazão do leite desnatado.



Fonte: Acervo pessoal.

Os resultados mostram que à medida que a pasta foi inserida no leito vibrofluidizado, o calor fornecido pelo fluido na forma de energia térmica para o filme líquido que está presente na superfície da esfera de vidro, promoveu a evaporação da água contida no leite desnatado. Esta energia transferida na forma de calor sensível para a pasta faz com que a temperatura do ar na saída do equipamento tenha seu valor reduzido até alcançar um valor que

não varie mais com o tempo de processo. Como no sistema o fornecimento de energia para a secagem de pasta foi o mesmo, uma vez que todos os experimentos foram realizados a temperatura de 100°C e velocidade do fluido 20% acima da velocidade da mínima fluidização, quando aumentou-se a vazão de pasta a ser inserida no leito, uma maior quantidade de energia proveniente do ar foi necessária para realizar a evaporação da água. Este maior fornecimento de energia promoveu uma maior redução da temperatura do ar na saída do leito. Desta forma quanto maior a vazão de pasta inserida no leito vibrofluidizado, menor será a temperatura do ar na saída do equipamento.

Quando foi realizada uma comparação das curvas de temperatura do ar na saída do leito, referentes aos ensaios realizadas a vazão de 14mL/min presentes nas duas configuração de agitação, em que se manteve a amplitude e aumentou-se a frequência vibracional, verificou-se para a amplitude de 0,003m, os ensaios referentes a frequência de 400RPM a temperatura do ar alcançada no novo regime permanente foi de 66°C a 600 segundos. Ao aumentar a frequência vibracional para 1100RPM a temperatura do ar foi de 69°C a 400 segundos. Para os ensaios realizados com amplitude de 0,015m, o mesmo comportamento foi observado, pois para a amplitude de 100RPM a temperatura do ar na saída do leito foi de 63°C a 500 segundos. Quando aumentou-se a frequência vibracional para 600RPM a temperatura do ar na saída do leito foi de 65°C a 400 segundos.

Como já foi mencionado no subitem anterior que o aumento da circulação das esferas de vidro dentro do leito vibrofluidizado promovido pelo aumento da frequência vibracional, facilitou o escoamento do ar através do meio particulado úmido e como o mesmo é responsável pelo transporte de energia térmica, conforme mostrado na equação 9:

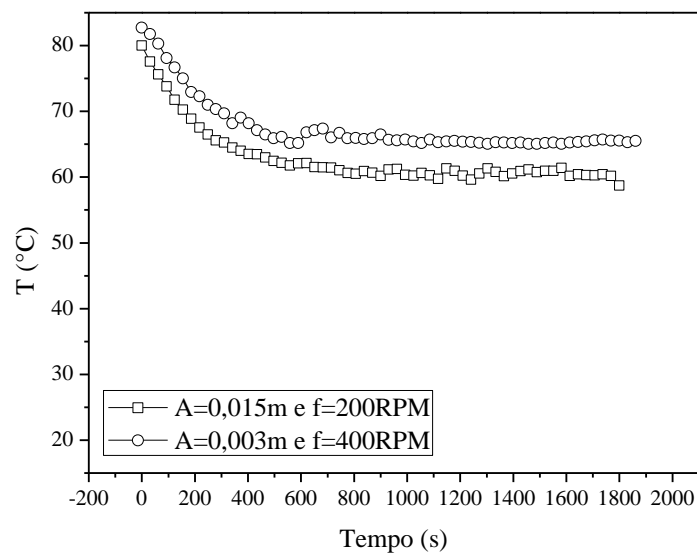
$$Q = \dot{m}c_p\Delta T \quad (9)$$

Onde Q é a quantidade calor transferido para a pasta,  $\dot{m}$  a vazão do fluido,  $c_p$  o calor específico do ar a pressão constante e  $\Delta T$  diferença de temperatura da entrada e da saída da câmara de secagem. Logo, pode-se considerar que a movimentação do material particulado, ao facilitar o escoamento do ar durante o processo, promoveu um maior transporte da energia térmica disponível para a secagem do leite desnatado, aumentando assim os patamares de temperatura do ar na saída do leito.

Conforme já foi visto no subitem anterior, diante dos resultados da umidade relativa do ar na saída do leito, pode-se concluir que os fenômenos envolvidos durante o processo de secagem do leite desnatado são influenciados da maneira como o ar irá escoar através do meio

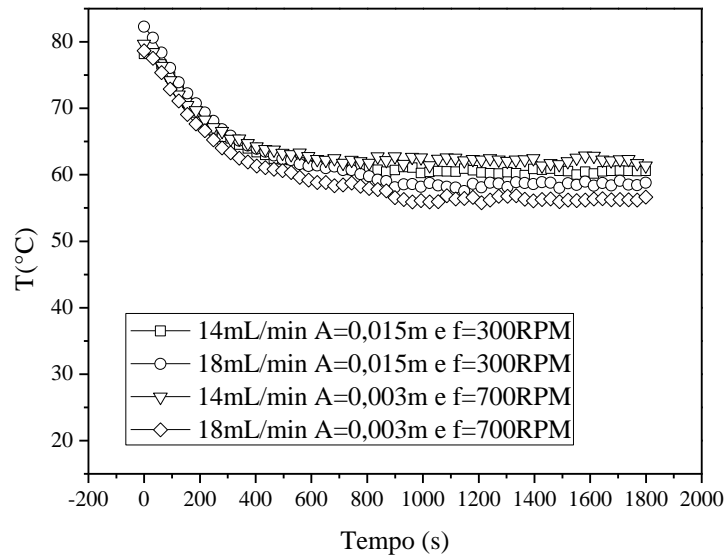
particulado úmido, ou seja, irá depender da configuração estrutural formada pelas esferas de vidro, juntamente com a presença de pontes líquidas e a movimentação das mesmas (decorrente da intensidade de agitação) durante o processo. Contudo, no início deste subitem foi mencionado que a temperatura do ar na saída do leito vibrofluidizado está diretamente relacionada com a saturação do mesmo ao final do processo, e uma vez que no subitem 4.3.3 foi-se discutido com detalhes o comportamento da umidade relativa do ar durante a secagem do leite desnatado, que neste momento pretende-se apenas apresentar os gráficos de temperatura do ar na saída do leito em função do tempo, conforme mostrados nas figuras 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29, para assim reforçar e confirmar o que já foi discutido.

Figura 4.26: Temperatura do ar na saída do leito vibrofluidizado quando submetido a agitação com  $\Gamma=0,53$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=400\text{RPM}$ ) e  $\Gamma=0,65$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=200\text{RPM}$ ) para a vazão de  $14\text{mL}/\text{min}$ ,  $T=100^\circ\text{C}$  e  $U_s=1,20U_{mf}$ .



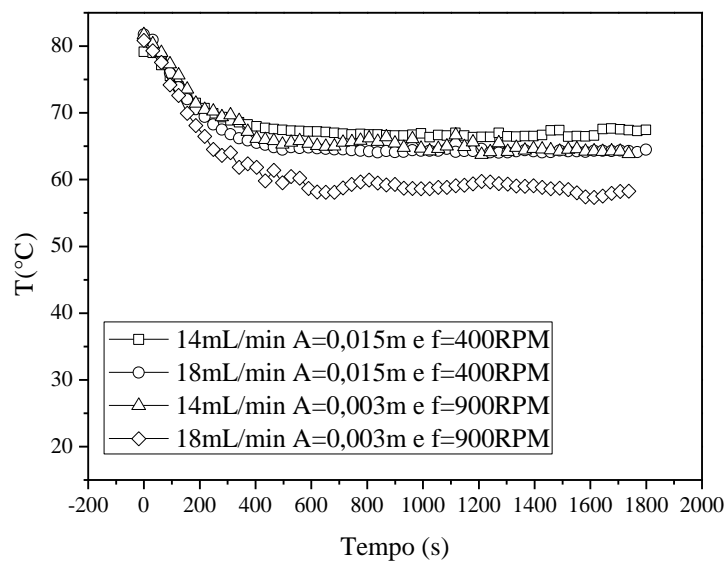
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4.27: Temperatura do ar na saída do leito vibrofluidizado quando submetido a agitação com  $\Gamma=1,65$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=700\text{RPM}$ ) e  $\Gamma=1,48$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=300\text{RPM}$ ) para as vazões de  $14\text{mL}/\text{min}$  e  $18\text{mL}/\text{min}$ ,  $T=100^\circ\text{C}$  e  $U_s=1,2U_{mf}$ .



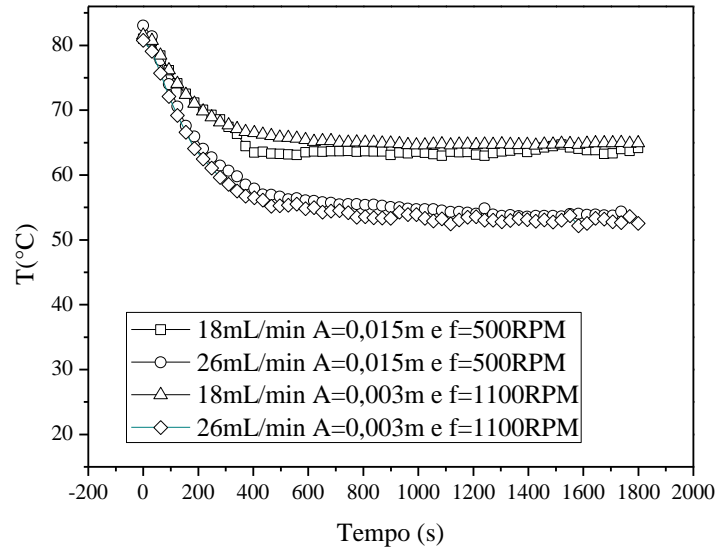
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4.28: Temperatura do ar na saída do leito vibrofluidizado quando submetido a agitação com  $\Gamma=2,7$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=900\text{RPM}$ ) e  $\Gamma=2,69$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=400\text{RPM}$ ) para as vazões de  $14\text{mL}/\text{min}$  e  $18\text{mL}/\text{min}$ ,  $T=100^\circ\text{C}$  e  $U_s=1,2U_{mf}$ .



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4.29: Temperatura do ar na saída do leito vibrofluidizado quando submetido a agitação com  $\Gamma=4,06$  ( $A=0,003\text{m}$  e  $f=1100\text{RPM}$ ) e  $\Gamma=4,2$  ( $A=0,015\text{m}$  e  $f=500\text{RPM}$ ) para as vazões de  $18\text{mL/min}$  e  $26\text{mL/min}$ ;  $T=100^\circ\text{C}$  e  $U_s=1,2U_{mf}$ .



Fonte: Acervo pessoal.

Diante do que foi apresentado, ficou evidente que o comportamento da temperatura do ar na saída do leito também sofreu influência dos fatores que interferiram no escoamento do ar através do leito particulado, proporcionadas pela intensidade de agitação no meio particulado, simultaneamente, com a influência da quantidade de pasta na circulação das esferas de vidro.

#### 4.3.4 Vazão de alimentação de pasta

Com o decorrer dos experimentos, foi observada que a vazão de alimentação máxima do leite desnatado, alcançada em todas as condições experimentais, não correspondeu a quantidade de pasta referente a saturação sistema. Foi verificado que o leito entrou em colapso antes mesmo de atingir este estado, não promovendo mais a fluidização do leito particulado úmido. Diante disso, serão apresentados, na tabela 5, os dados de vazão máxima de alimentação de pasta em função das condições vibracionais utilizadas.



Tabela 5: Vazão máxima de alimentação do leite desnatado obtida no leito vibrofluidizado.

Amplitude (m)	Frequência (RPM)	$\Gamma$	Vazão Máxima de alimentação de pasta (mL/min)
0,015	600	6,04	26
0,015	500	4,19	26
0,015	400	2,69	22
0,015	300	1,48	22
0,015	200	0,65	18
0,015	100	0,164	14
0,003	1100	4,06	26
0,003	1000	3,36	22
0,003	900	2,7	18
0,003	800	2,15	18
0,003	700	1,65	18
0,003	600	1,2	18
0,003	500	0,83	18
0,003	400	0,53	14

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o apresentado na tabela, pode-se verificar que a vazão máxima de leite desnatado foi dependente da intensidade de agitação imposta no equipamento. Usando como exemplo a amplitude de 0,015m, verificou que para a frequência de 600RPM, a vazão máxima de alimentação do leite foi 26mL/min. Quando a frequência foi reduzida para 100RPM a vazão máxima foi 14mL/min. O mesmo comportamento foi observado para a amplitude de 0,003m, pois na frequência de 1100RPM a vazão máxima foi 26mL/min e na frequência de 400RPM a vazão máxima foi 14mL/min. Esta tendência encontrada para as duas amplitudes, mostrou que a redução da frequência vibracional no sistema, diminuiu a capacidade do leito vibrofluidizado em romper as pontes líquidas e sólidas que surgem no leito particulado devido as características do leite desnatado, à medida que a pasta foi alimentada na câmara de secagem, provocando assim a não fluidização do leito particulado úmido.

Quando foi realizada uma comparação das vazões máximas de alimentação de pasta obtidas para as intensidades de agitação que apresentaram valores de  $\Gamma$  bem próximos, porém combinações diferentes de amplitude e frequência, foi verificado que os  $\Gamma$  com valores de 2,7; 1,5 e 0,5 tiveram a vazão máxima de leite maior para os sistemas em que a vibração teve a amplitude igual a 0,015m. No entanto, para o  $\Gamma$  com valor próximo de 4, como se trata de uma intensidade de agitação mais forte, foi verificado para as duas combinações de amplitude e frequência uma mesma vazão de pasta. Diante destes resultados, pode-se inferir que para as intensidades de agitação em que o  $\Gamma > 4$ , o trabalho desenvolvido pela vibração do leito foram

capazes de manter o material particulado úmido em movimento, pois a força resultante que envolvem o sistema desenvolveu um trabalho sobre as esferas de vidro, que foi transferido na forma das energias cinética e potencial e conseguiu promover a ruptura das pontes sólidas e líquidas presentes no leito particulado, quando a câmara de secagem foi alimentada com uma vazão de pasta de 26mL/min. Porém, quando o  $\Gamma < 4$ , o trabalho desenvolvido pelo pleno do equipamento para promover o rompimento das pontes líquidas e sólida foi influenciada pela amplitude, uma vez que tiveram vazões máximas diferentes e as maiores foram encontrada para  $A=0,015m$ .

A partir dos resultados encontrados pode-se verificar que, assim como no comportamento fluidodinâmico do leito de partículas secas, a intensidade de agitação também exerceu uma influência significativa no processo de secagem de pasta quanto à quantidade de leite a ser inserida no equipamento, uma vez que pastas como o leite desnatado têm características coesivas que dificultam a fluidização do material particulado e promovem a extinção leito ao invés de alcançar a saturação máxima do sistema. Além de mostrar que dependendo da vibração empregada no equipamento, a vazão máxima de alimentada de pasta pode ser dependente da amplitude e da frequência utilizada.

#### **4.3.5 Taxa de produção e acúmulo de pó**

Neste subitem serão apresentadas as taxas de produção do pó obtidos no leito vibrofluidizado durante a secagem do leite desnatado, quando o processo foi submetido a diferentes intensidades de agitação. Também pretende-se mostrar a taxa de acúmulo do pó do material que ficou retido no interior do equipamento ao final de cada experimento de secagem do leite desnatado. Para que fossem possíveis tais análises, durante os ensaios experimentais foram realizadas a coleta e pesagem da massa de pó obtido na saída do ciclone, de 10 em 10 minutos. Após 30 minutos de experimentos, cessava-se a alimentação de pasta, mas ainda deixava-se o leito ligado, coletando a quantidade de pó que estava acumulada no interior do leito vibrofluidizado, por um período de 30 minutos. A partir destes dados construiu-se a tabela 6 com os valores médios da taxa de produção de pó e taxa de acúmulo de pó coletados na saída do ciclone.

Tabela 6: Taxa de produção e Taxa de acúmulo de pó.

Amplitude (m)	Frequência (RPM)	Vazão de pasta (mL/min)	Taxa de produção de pó (g/min)	Taxa de acúmulo de pó (g/min)
0,015	600	14	0,16	0,71
		18	0,27	0,18
		22	0,22	0,19
		26	0,23	0,11
	500	14	0,11	0,25
		18	0,19	0,11
		22	0,18	0,20
		26	0,19	0,08
	400	14	0,15	0,26
		18	0,18	0,24
		22	0,15	0,21
		26	0,10	0,11
300	14	0,10	0,11	
	18	0,20	0,14	
	22	0,04	0,01	
	26	0,03	0,05	
200	14	0,03	0,05	
	18	0,03	0,04	
	100	14	0,01	0,01
	1100	14	0,05	0,04
18		0,10	0,07	
22		0,06	0,08	
26		0,04	0,09	
1000	14	0,04	0,04	
	18	0,10	0,07	
	22	0,05	0,08	
	900	14	0,04	0,03
18		0,09	0,04	
800		14	0,03	0,03
		18	0,03	0,06
	700	14	0,04	0,05
		18	0,02	0,03
600		14	0,02	0,02
		18	0,01	0,03
	500	14	0,01	0,02
		18	0,05	0,07
400		14	0,01	0,01

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o que foi mostrado na tabela 6, de um modo geral, verificou-se que a taxa de produção de pó apresentou valores muito pequenos, inferiores a 1g/min, em todos os

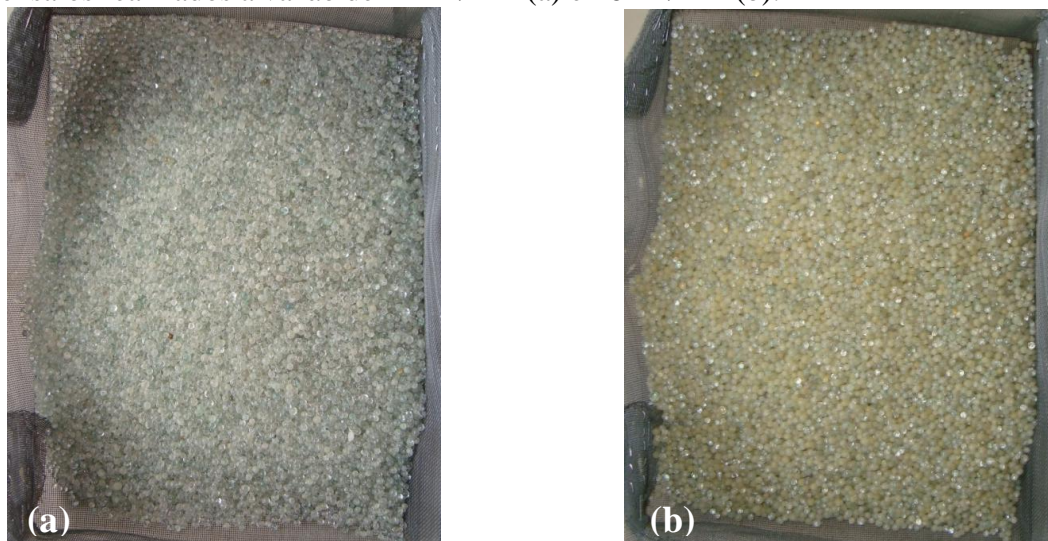
ensaios experimentais. No entanto, pode-se observar uma única tendência para esta variável, a influência da amplitude de agitação durante o processo de secagem do leite desnatado. Pois pode-se verificar que os maiores valores da taxa de produção do pó foram encontrados para os experimentos que tiveram a agitação com amplitude de 0,015m.

O mesmo comportamento observado para a taxa de produção de pó também pode ser constatado para a taxa de acúmulo de pó que ficou retido dentro do leito, que correspondeu a pouca quantidade de material coletado na saída do ciclone, porém os maiores valores foram obtidos pelos sistemas que apresentaram a maior amplitude trabalhada, 0,015m.

Os fatores que podem ter interferido na quantidade de pó produzido e também na quantidade de pó acumulado que foi eliminado no final dos experimentos, além dos parâmetros que influenciaram na umidade relativa e temperatura do ar na saída do leito, amplitude e frequência. Uma hipótese provável foi a quantidade de leite utilizada, já que se trata de um equipamento de pequenas dimensões e não possibilitou o uso de vazões de pasta muito grandes. Outro fator provavelmente foi a pasta utilizada para a realização dos experimentos, pois segundo Nascimento (2013), a ausência de gordura na composição do leite desnatado faz com que a mesma apresente uma característica coesiva mais significativa, ficando o pó aderido na superfície das esferas de vidro, conforme mostrado na figura 4.30, e não possibilitando o uso de vazões de pastas maiores que 26mL/min. O último fator que também pode ter influenciado na quantidade de pó produzido foi o tamanho do ciclone, pois uma grande quantidade de material ficou retido dentro do mesmo durante o processo de secagem. Tal consequência pode estar relacionada com as dimensões do equipamento, pois o ciclone usado não foi construído para coletar materiais muito fino como o produzido durante a secagem do leite desnatado, favorecendo assim a aderência do pó em suas paredes.

Mesmo se tratando de uma pequena quantidade de material coletado na saída do ciclone, diante dos resultados apresentados pode-se considerar que o trabalho desenvolvido pelo equipamento para as amplitudes de 0,015m, promoveu maiores colisões entre as esferas de vidro e as esferas de vidro e a parede do leito, comparado com o que foi visualizado nos experimentos em que a amplitude foi de 0,003m. Tais fatores tornaram possível que a película de leite desnatado seco, que estava aderida na superfície do material inerte, fosse fraturada e se transformasse em pó mais facilmente, aumentando um pouco mais a quantidade de material coletado na saída no ciclone.

Figura 4.30: Fotos das esferas de vidro recolhidas ao final do processo de secagem, referentes aos ensaios realizados a vazão de 14mL/min (a) e 26mL/min (b).



Fonte: Acervo pessoal.

Em face do que foi apresentado neste subitem, pode-se concluir que as intensidades de agitação que apresentaram a amplitude de 0,015m, tornaram mais significativa as taxas de produção e acúmulo de pó obtidos no leito vibrofluidizado, confirmando também a não universalidade do número adimensional de vibração. No entanto, com estes resultados ficou evidente que a circulação das esferas de vidro correspondem ao fator mais importante para a produção do pó ao final do processo de secagem de pasta, sendo a mesma influenciada pela amplitude de agitação e também pela quantidade de pasta inserida no equipamento.

#### 4.3.6 Conteúdo de água no pó

Todo o pó que foi recolhido na saída do ciclone durante a secagem do leite desnatado foi pesado e levado a uma estufa, por um período de 24 horas, a fim de avaliar a conteúdo de água presente neste pó produzido. Diante disso, na tabela 7 serão apresentados os dados de umidade do pó recolhido na saída do ciclone, para os ensaios experimentais realizados no leito vibrofluidizado.

Tabela 7: Umidade do pó do leite desnatado recolhido na saída do ciclone em função do tempo de processo.

Amplitudes (m)	Frequências (RPM)	Vazão de pasta (mL/min)	U <sub>bu</sub> (%)			
			0- 10min	10- 20min	20- 30min	30- 60min
0,015	600	14	9,12	8,59	7,38	2,10
		18	10,40	9,15	8,97	4,79
		22	15,50	10,97	11,81	4,52
		26	13,40	11,70	10,26	4,14
	500	14	9,30	7,37	6,70	2,86
		18	10,95	11,63	11,42	5,83
		22	14,22	13,64	14,07	4,83
		26	14,26	12,56	11,75	4,87
	400	14	10,67	8,54	9,15	3,91
		18	8,48	8,66	7,36	3,43
		22	11,70	10,96	9,06	3,78
		26	13,39	11,34	9,88	4,54
300	18	12,93	11,43	10,72	5,38	
	22	16,20	11,11	16,67	11,36	
	26	17,34	15,56	13,58	7,61	
	18	15,09	10,96	10,48	7,18	
200	14	10,95	18,01	11,53	3,29	
	14	10,86	8,16	8,52	4,18	
	18	11,09	11,51	9,74	5,05	
	22	13,05	13,07	10,95	6,67	
0,003	1100	26	12,98	12,27	11,82	5,96
		14	10,32	13,14	14,31	6,33
		18	13,82	18,14	13,60	7,52
		22	12,57	13,98	12,45	7,29
	1000	14	8,79	11,71	9,35	6,33
		18	10,88	13,02	11,74	6,08
		14	10,33	13,64	6,67	3,16
		18	10,77	11,33	9,51	4,22
	900	14	13,93	10,57	11,02	5,90
		18	7,26	8,90	12,45	6,26
		14	11,06	8,47	15,56	11,91
		18	8,02	15,36	8,74	4,50
800	14	12,01	17,14	17,30	6,33	
	18	13,82	18,18	10,46	7,52	
	14	8,33	13,63	10,63	3,16	
	18	13,82	18,18	10,46	7,52	
700	14	11,06	8,47	15,56	11,91	
	18	8,02	15,36	8,74	4,50	
	14	12,01	17,14	17,30	6,33	
	18	13,82	18,18	10,46	7,52	
600	14	11,06	8,47	15,56	11,91	
	18	8,02	15,36	8,74	4,50	
	14	12,01	17,14	17,30	6,33	
	18	13,82	18,18	10,46	7,52	
500	14	11,06	8,47	15,56	11,91	
	18	8,02	15,36	8,74	4,50	
	14	12,01	17,14	17,30	6,33	
	18	13,82	18,18	10,46	7,52	
400	14	11,06	8,47	15,56	11,91	
	18	8,02	15,36	8,74	4,50	
	14	12,01	17,14	17,30	6,33	
	18	13,82	18,18	10,46	7,52	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme os resultados mostrados na tabela 7, constatou-se que a umidade do pó produzido na secagem do leite desnatado não variou significativamente com as diferentes

intensidades de agitação utilizadas, uma vez que os valores desta variável ficaram muito próximos para todos os ensaios realizados. No entanto, foi observado que outros parâmetros experimentais influenciaram na umidade do pó, o tempo de processo e a vazão de alimentação de pasta. Pois com o transcorrer da secagem, o pó produzido teve sua quantidade de água reduzida. Quando aumentou-se a quantidade de leite desnatado inserido no leito vibrofluidizado, a quantidade de água presente no material coletado apresentou um pequeno aumento.

A partir do que foi observado no subitem anterior, juntamente com os resultados de umidade do pó, notou-se que a quantidade de pó produzido durante os experimentos provavelmente não foram suficientes para que fosse possível verificar qualquer tipo de interferência proporcionada pelas diferentes condições de vibração. Como o secador utilizado pode ser considerado um ‘elemento de volume’ de um secador de escala industrial, o objetivo do presente trabalho consistiu em focar suas análises nos fundamentos que envolvem a secagem e não em realizar uma análise aprofundada na produção e eficiência do processo.

#### **4.3.7 Análise do modelo CST/Rede Neural**

De acordo com o que foi mencionado e apresentado na revisão bibliográfica, o modelo CST/Rede Neural foi utilizado para descrever os comportamentos mássicos e térmicos da secagem de leite desnatado em leito vibrofluidizado, quando o mesmo foi submetido a diferentes intensidades de agitação. Para isso os dados experimentais obtidos durante os ensaios foram utilizados como banco de dados para a construção, treinamento e verificação de uma rede neural artificial, com o intuito de descrever o termo de acoplamento entre as fases, expressa pela letra  $k$  presente nas equações de 3 a 5. A rede neural foi selecionada para determinar este parâmetro, pois corresponde a uma metodologia empírica que uma única estrutura consegue descrever várias situações experimentais. Tal fato pode ser observado nos trabalhos de Nascimento et al., (2013), Costa et al., (2014), Costa et al., (2016), Silva (2015), Rosanova et al., (2017).

A construção desta rede neural artificial, basicamente, correspondeu a uma rotina desenvolvida no software MATLAB, em que seu banco de dados foi estruturado através de camadas, de acordo com a arquitetura de rede *feedforward*, camada de entrada, camada intermediária e camada de saída. Na camada de entrada foram informadas as variáveis tempo

de processo, vazão de pasta, amplitude e frequência vibracional. Já na camada de saída, os valores do termo de acoplamento entre as fases vide a equação 6.

Na etapa de treinamento da rede neural, que correspondeu a definição do número de neurônios da camada intermediária, a quantidade destes neurônios foi estabelecida quando encontrou-se o maior valor para o coeficiente de correlação ( $R^2$ ), juntamente com as avaliações gráficas dos valores de  $k$  preditos, que representasse de forma satisfatória os valores experimentais do termo de acoplamento entre as fases, para as condições que não foram usadas no treinamento da mesma. A determinação das condições experimentais que não foram usadas nesta etapa foi arbitrária e corresponderam aos seguintes ensaios: vazão de 14mL/min,  $A=0,015m$  e  $f=400RPM$ , e vazão de 18mL/min,  $A=0,003m$  e  $f=900RPM$ . A retirada destas duas condições do banco de dados durante o treinamento foi realizada com o intuito de verificar a adequação da rede neural construída para a interpolação de novas condições.

A partir destes resultados, foi verificado que dois neurônios na camada intermediária foram suficientes para que a rede neural construída obtivesse os valores do  $R^2$  igual 0,99968 e os valores de  $k$  preditos, referentes as condições experimentais que não foram usadas no treinamento, fossem próximas aos dados de  $k$  experimentais. Como se trata de parâmetro que apresenta o comportamento semelhante para todas as condições experimentais, era esperado que poucos neurônios na camada intermediária fossem suficientes para descrever o processo.

Nas figuras 4.31, 4.32 e 4.33 serão apresentados os resultados da rede neural construída e treinada referente aos gráficos os dados de  $k$  experimentais versus os dados de  $k$  preditos pela rede neural e as curvas do termo de acoplamento entre as fases em função do tempo de processo para as condições que corresponderam a vazão de 14mL/min, agitação de  $A=0,015m$  e  $f=400RPM$ , e vazão de 18mL/min e agitação com  $A=0,003m$  e  $f=900RPM$ , respectivamente.



Figura 4.31: Valores de k experimentais versus os valores de k obtidos pela rede neural construída e treinada.

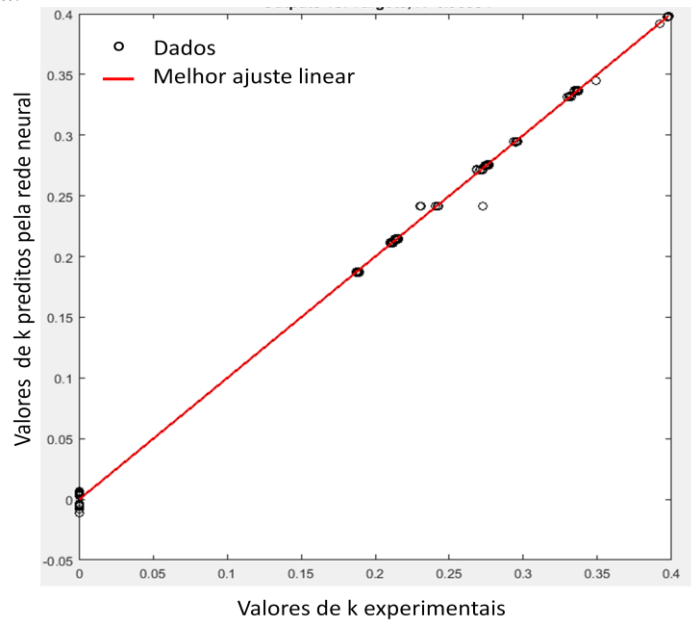


Figura 4.32: Valores do termos de acoplamento entre as fases experimentais e obtidos pela rede neural que representam a condição de 14mL/min, A=0,015m e f=400RPM.

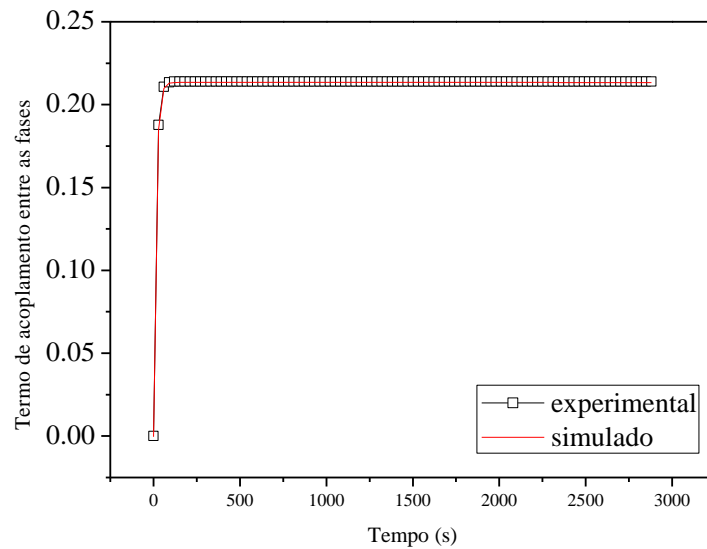
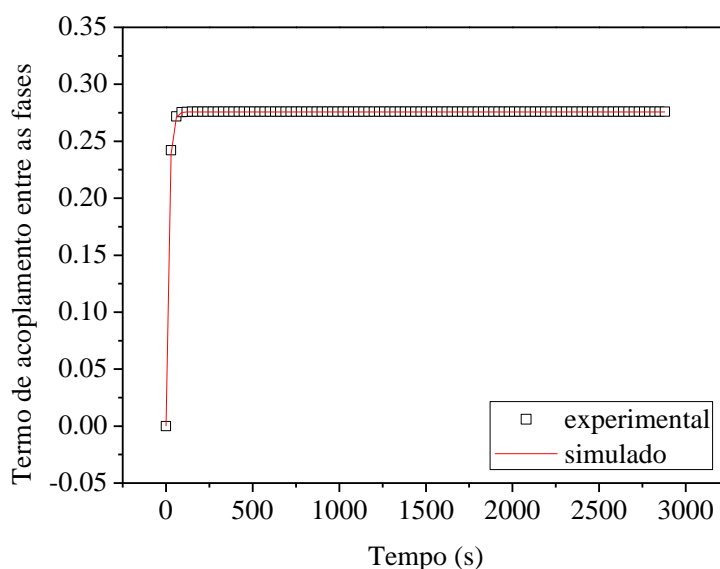


Figura 4.33: Valores dos termos de acoplamento entre as fases experimentais e obtidos pela rede neural que representam a condição de 18mL/min, A=0,003m e f=900RPM.

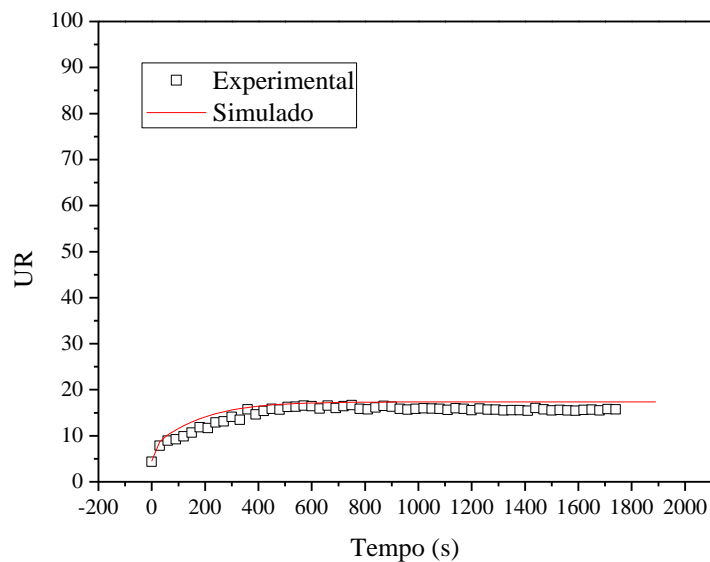


Fonte: Acervo pessoal.

A partir das figuras 4.32 e 4.33 pode-se verificar que a rede neural foi capaz de determinar com precisão os valores de  $k$  referentes às condições experimentais não treinadas, confirmando assim que houve uma boa concordância entre os dados experimentais usados no treinamento da rede neural artificial com os dados previstos pela mesma.

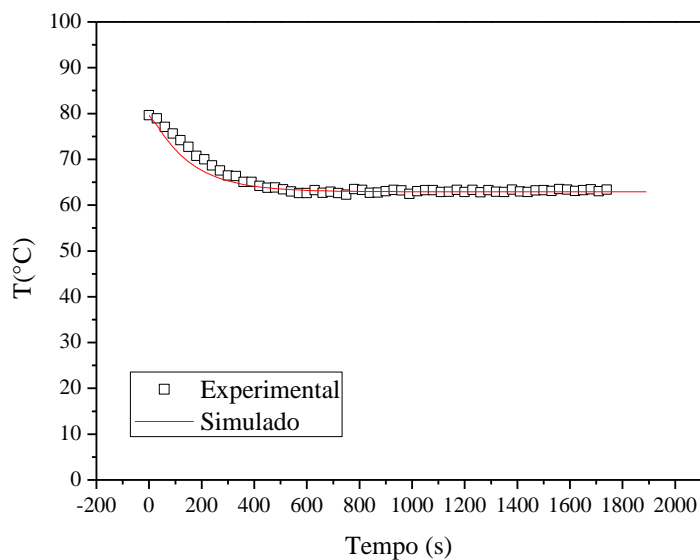
O bom desempenho da rede para determinar o termo de acoplamento entre as fases possibilitou usá-la em conjunto ao modelo fenomenológico CST, originando assim o modelo híbrido CST/Rede Neural, para assim poder descrever os fenômenos de transferência de calor e massa que acontecem durante a secagem do leite desnatado. Dos resultados obtidos através das simulações, estão apresentados na figura 4.34, 4.35 e 4.36 os gráficos dos valores simulados e experimentais referentes as variáveis temperatura do ar na saída do leito, umidade relativa e umidade do pó em função do tempo, quando o leito foi submetido a vazão de 14mL/min, amplitude de 0,015m e f=400RPM. Estes resultados mostram o comportamento do modelo híbrido diante de uma condição usada apenas para verificação da rede neural. Como todos os experimentos realizados neste trabalho tiveram comportamentos semelhantes ao aqui apresentado, os outros resultados das simulações obtidas não serão apresentados, afim de não sobrecarregar a tese com informações idênticas.

Figura 4.34: Dados experimentais e simulados da umidade relativa do ar na saída do leito vibrofluidizado para os experimentos realizados a temperatura de 100°C, velocidade do ar de entrada 20% acima da velocidade de mínima fluidização e vazão de pasta de 14mL/min.



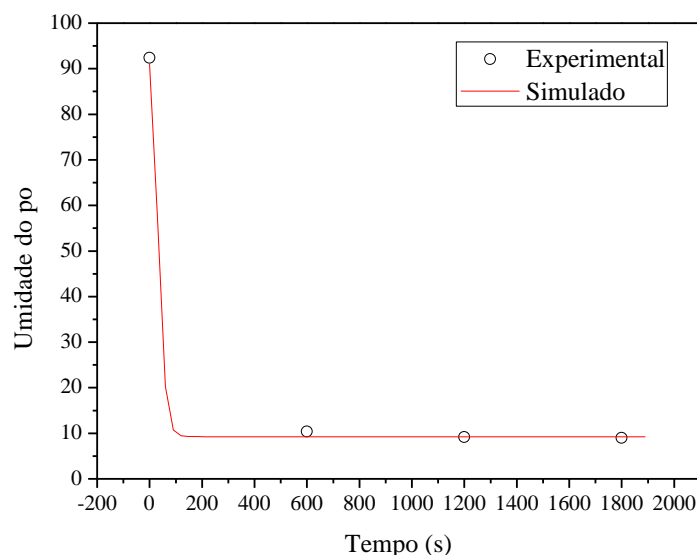
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4.35: Dados experimentais e simulados da temperatura do ar na saída do leito vibrofluidizado para os experimentos realizados a temperatura de 100°C, velocidade do ar de entrada 20% acima da velocidade de mínima fluidização e vazão de pasta de 14mL/min.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4.36: Dados experimentais e simulados da umidade do pó coletado na saída do ciclone para os experimentos realizados a temperatura de 100°C, velocidade do ar de entrada 20% acima da velocidade de mínima fluidização e vazão de pasta de 14mL/min.



Fonte: Acervo pessoal.

A concordância encontrada entre os valores experimentais e simulados pelo o modelo híbrido CST/Rede Neural, pode ser considerado um indicativo de que a hipótese estabelecida para o desenvolvimento deste modelo, em que o leito vibrofluidizado comporta-se como um leito perfeitamente agitado não deve estar tão distante da realidade deste equipamento.

Outro fator que pode ser observado diante destes resultados foi à conveniência de se usar uma rede neural artificial para estimação de parâmetros ou variáveis que dificilmente são determinadas fenomenologicamente. A construção de redes neurais artificiais através de software como MATLAB, por exemplo, é uma tarefa relativamente simples, uma vez que o programa apresenta uma interface amigável, que possibilita ao final do treinamento e verificação da rede neural obter uma equação algébrica matricial facilmente implementada em qualquer computador. A única desvantagem que esta metodologia apresenta é a necessidade de um grande banco de dados para a obtenção de uma melhor rede neural.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

Diante do que foi proposto neste trabalho e dos resultados encontrados para as condições avaliadas, serão apresentadas as conclusões obtidas referentes a caracterização fluidodinâmica do leito vibrofluidizado, quando o mesmo foi constituído de diferentes diâmetros de esferas de vidro. Bem como as conclusões das análises de evaporação de água conforme os aspectos térmico e mássico do processo diante de diferentes temperaturas e vazões de ar, e, posteriormente, das análises de secagem do leite desnatado, através de aspectos fluidodinâmico, térmico e mássico levando em consideração as diferentes intensidades de agitação que o equipamento foi submetido.

Conforme os resultados encontrados para a caracterização fluidodinâmica do leito fluidizado convencional, constatou-se que o diâmetro da esfera de vidro não influenciou na queda de pressão na mínima fluidização, uma vez que foram obtidos os mesmos valores de queda de pressão na região de mínima fluidização para as três esferas trabalhadas. Houve apenas, como esperado, a dependência da velocidade de mínima fluidização com o diâmetro do material particulado.

Em relação ao comportamento fluidodinâmico obtido para o leito vibrofluidizado quando o mesmo foi submetido a diferentes intensidades de agitação e constituído de esferas de vidro com diferentes diâmetros, observou-se que o mesmo comportamento foi encontrado para os três diâmetros utilizados. Nos resultados pode-se constatar que para a maior amplitude, o aumento da frequência vibracional proporcionou uma redução na queda de pressão referente a mínima fluidização e uma maior oscilação da queda de pressão dentro do leito. No entanto, na variável velocidade de mínima fluidização a influência não foi tão significativa com o aumento da frequência vibracional. Ao reduzir a amplitude para 0,003m, nas curvas características não foi constatada uma tendência para as variáveis queda de pressão e velocidade de mínima fluidização, pois seus valores ficaram muito próximos. Porém as

curvas do desvio padrão de queda de pressão mostraram que o aumento da frequência vibracional promoveu um aumento expressivo nas oscilações da queda de pressão.

Na análise de evaporação de água, primeiramente, constatou-se que o potencial evaporativo do leite é influenciado pelo diâmetro do material inerte, pois ao reduzir o tamanho do material, foram alcançada maiores valores da saturação do ar na saída do leite. No entanto, pode-se verificar que mesmo a esfera de vidro com o diâmetro de 0,00119m promovendo o aproveitamento do ar durante o processo de evaporação de água, não possibilitou seu uso para realizar a secagem do leite desnatado no equipamento, pois neste diâmetro não foi possível obter a produção do pó ao final do processo. Ao realizar uma análise térmica e mássica do processo diante de um único diâmetro, pode-se contatar que o leite vibrofluidizado foi capaz, como esperado, de suportar maiores vazões de alimentação de água, para maiores valores de temperatura e velocidade superficiais do ar. Além de mostrar que a temperatura e a umidade relativa do ar na saída do leite foram dependentes das condições de temperatura e vazão de ar de entrada do processo, bem como, com a vazão de alimentação de água destilada.

Diante do que foi encontrado para o processo de secagem do leite desnatado em leite vibrofluidizado, os resultados referentes ao comportamento fluidodinâmico do leite úmido, mostrou que a variação da queda de pressão durante o processo de secagem foi influenciada pela amplitude do processo e pela vazão de pasta, uma vez que maiores variações da queda de pressão em relação ao valor obtido no início do processo foram encontrados para a agitação com amplitude de 0,015m. Além de observar que nesta amplitude o leite particulado apresentou o maior surgimento de canais preferenciais, bolas e bolsões de ar durante o processo de secagem. Com relação a vazão de pasta, pode-se observar que a medida que aumentou-se a vazão de pasta, as variações da queda de pressão foram reduzindo e ficando muito semelhantes aos valores obtidos no início do experimentos de secagem.

Para os dados da umidade relativa do ar, pode-se constatar que a vazão de alimentação de pasta influenciou no valor máximo alcançado no novo regime, pois à medida que aumentou a quantidade de pasta inserida no leite vibrofluidizado, maiores patamares da saturação do ar foram alcançados no sistema. Quando foi avaliado as diferentes combinações de amplitude e frequência que apresentaram a mesma intensidade de agitação, verificou-se que além das diferentes configurações de agitação a quantidade de pasta também pode exercer influência na saturação do ar na saída do leite. Entretanto, de um modo geral pode-se

considerar que as intensidades de agitação com amplitude de 0,003m promoveram um aumento do potencial evaporativo do leito vibrofluidizado durante o processo de secagem.

Com relação aos dados de temperatura do ar na saída do leito, como o seu comportamento está diretamente relacionado com a umidade relativa, os resultados obtidos durante os ensaios experimentais confirmaram o que foi discutido e verificado nos resultados de umidade relativa do ar na saída do leito vibrofluidizado.

Para os resultados de vazão de alimentação de pasta, pode-se constatar que as vazões máximas foram influenciada pela intensidade de agitação implementada no equipamento. Pois para as duas amplitudes trabalhadas, quando aumentou-se a frequência vibracional tornou maior a capacidade do leito de promover a ruptura das pontes líquidas e sólidas, e assim aumentar a quantidade de pasta inserida no equipamento. No entanto, quando comparou-se combinações distintas de amplitude e frequência que resultaram em um mesmo número adimensional de vibração, foi verificado que para os valores de  $\Gamma$  próximos de 4, mesmas quantidades mássicas de vazão de pasta foram alcançadas pelo leito. Porém para valores de  $\Gamma < 2,7$ , a amplitude passou a influenciar no processo e possibilitar o uso de maiores vazões de pasta durante a secagem.

Para a taxa de produção de pó obtido durante o processo de secagem do leito desnatado, pode-se constatar que os ensaios referentes às maiores amplitudes tiveram os maiores valores da taxa de produção de pó durante o processo, uma vez que o deslocamento do material particulado dentro do leito foi maior para as agitações que tiveram a amplitude de 0,015m.

Com relação à taxa de acúmulo do pó que ficou retido dentro do leito vibrofluidizado ao final do processo de secagem, pode-se constatar primeiramente que houve acúmulo do material dentro do equipamento. Pois assim que encerrava-se a alimentação de pasta no leito e mantinha o mesmo ligado, sempre tinha uma quantidade de material que era coletado ao final de todos os ensaios experimentais. Porém verificou-se que as maiores quantidade de pó acumulado no leito, coletados na saída do ciclone, foram principalmente para a amplitude de 0,015m.

Para a umidade do pó produzido, foram observados valores muito próximos para todas as condições vibracionais trabalhadas. A existência de material acumulado não possibilitou que uma quantidade suficiente de material particulado fosse recolhido na saída do ciclone e, assim, pudesse analisar a influência da vibração durante o processo de secagem.

Com relação ao modelo utilizado, observou-se que bons resultados foram obtidos, tanto para a rede neural artificial quanto para o modelo híbrido CST/Rede Neural. Pois, independente da intensidade de agitação implementada no equipamento, o modelo conseguiu descrever os fenômenos de transferência de calor e massa que envolvem o processo de secagem de pasta do leite desnatado. Além de confirmar que o leite vibrofluidizado comportou-se próximo a um tanque perfeitamente agitado.

Assim, como conclusão final deste trabalho verifica-se que a circulação do material particulado, desenvolvido na câmara de secagem, foi o fator que mais influenciou nos fenômenos de transferência de calor e massa que ocorreram durante o processo de secagem do leite desnatado. Pois diante do que foi visto nos resultados experimentais, ficou nítido que o comportamento do material inerte durante a secagem de pasta foi influenciado pela combinação de amplitude e frequência de agitação que foi implementada no equipamento, juntamente, com a quantidade de pasta que foi inserida no mesmo. Com isso, pode-se confirmar que o número adimensional de vibração deve ser cuidadosamente usado para caracterizar o leite vibrofluidizado, sendo muito importante informar os valores dos dois parâmetros vibracionais. Digno de nota também é a influência da pasta no processo de secagem. Pois, para o leite seco na presença de uma ‘pasta’ tipo a água, cuja reologia não varia com o transcorrer do processo, a taxa de evaporação depende significativamente da área disponível onde irão ocorrer as trocas térmicas e mássicas do processo. Assim a esfera de vidro com diâmetro de 0,00119m foi a que apresentou o melhor desempenho durante a evaporação. Já quando o processo é desenvolvido com uma pasta real, como o leite desnatado, por exemplo, além da área superficial onde ocorrem as trocas térmicas e mássicas, deve-se levar em consideração também as forças inerciais do material particulado. Neste caso, para o leite desnatado, a melhor esfera de vidro foi a com diâmetro de 0,00319m.



## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade a este trabalho serão dadas as seguintes sugestões:

- Desenvolver uma metodologia para quantificar a taxa de circulação e o número de colisões do material inerte dentro do leito vibrofluidizado, quando o mesmo for submetido a várias intensidades de agitação;
- Analisar a influência de outros tipos de inertes no comportamento fluidodinâmico e no processo de secagem de uma pasta com características coesivas, quando o leito vibrofluidizado for submetido a diferentes intensidades de agitação;
- Analisar a influência da intensidade de agitação no comportamento fluidodinâmico e na secagem de uma dada pasta, utilizando para quantificar o número adimensional de vibração um número maior de amplitudes e, também, várias frequências vibracionais;
- Analisar a influência da intensidade de agitação no processo de secagem de materiais granulares;
- Realizar simulações em CFD da fluidodinâmica do leito vibrofluidizado, analisando a influência dos parâmetros vibracionais na dinâmica do leito.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, A. R. F. **Análise da secagem de pasta em leito de jorro. 2009. 165 f. Tese de Doutorado em Engenharia Química** – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.
- BACHMANN, D., Verfanrenstechnik. Zeitschrift, Verein Deustscher Ingenieure Beiheft, Dusseldorf, Alemanha, n.2, p.43, 1940. In: THOMAS, B.; LUI, Y. A.; MASON, M; O.; SQUIRES, A. M. Vibrated Bed: New Tools for Heat Transfer. **Chemical Engineering Progress** n.6, v.84, p.65-75, 1988.
- BACELOS, M. S.; PASSOS, M. L.; FREIRE, J. T. Effect of interparticle forces on the conical spouted bed behavior of wet particles with size distribution. **Powder Technology**. Holanda. v. 174. p. 114-126. 2007.
- BALACHANDRAN, W. Electrostatic Effects in Adhesion of Particles to Solid Sufarces. In: BRISCOE, B. J.; ADAMS, M. J. **Tribology in Particulate Technology**. Inglaterra: Adam Higler, Bristol and Philadelphia. 1987. p. 136-153.
- BRATU, E.; JINESCU, G. I.; Ver, Chim. n.9, v.20, p. 547-557. 1969. In: FINZER, J. R. D.; KIECKBUSCH, T. G. Secagem em Sistemas com Vibração. In: FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. **Tópicos Especiais em Secagem**, São Carlos-SP, UFSCar, 1992, v.1, p.87-127.
- BRATU, E.; JINESCU, G. I.; Effect of vertical vibration on the pressure drop in a fluidized layer. **British Chemical Engineering**, n.8, v. 16, p. 691-695, 1971.
- CAMAGO, C. F. S. **Determinação do coeficiente global de transferência de calor de um cilindro submerso em um leito vibro-fluidizado**. 1998. 146f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos 1998.
- CASTELLANOS, J. A.; PALANCAR, M. C.; ARAGON, J. M. Designing and Optimizing a Neural Network for the Modeling of a Fluidized-Bed Drying Process. **Industrial and Engineering Chemistry Research**. v. 41. p. 2262-2269. 2002.
- CIESIELSKI, K. ZBICINSKI, K. Hybrid Nerual Modelling of Fluidised bed drying process. **Drying Technology**. Londres. n. 8. v. 19. p. 1725-1738. 2001.
- CHEN, Y. L.; LIN, P. S.; PENG, Y. L. Particle AgglomerationCharacteristics in Vibro-fluidized Bed Dryer. **Journal of Chemical Engineering of Japa**. n.5, v.24, p.385-392. 1991.
- CHEVILENKO, V. A.; MUSHTAYVEN, V. I.; KOROTOKOV, V. M.; IZHORIM, G. L.; LYALIN, V. A.; PLANOVSKI, A. N. 1979. In: PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S.; Theory and Application of Vibrated Beds and Vibrated Fluid Beds for Drying Process. **Advances in Drying**. Hemisphere Publishing Corporation, Washington, v. 3. P. 245-306. 1984.
- CHLENOV, V. A.; MIKHAILOV, N. V. Khim. Prom., n.12, p.910. 1964. In: THOMAS, B.; LUI, Y. A.; MASON, M; O.; SQUIRES, A. M. Vibrated Bed: New Tools for Heat Transfer. **Chemical Engineering Progress**. n.6, v.84, p.65-75, 1988.
- CHLENOV, V. A.; MIKHAILOV, N. V. 1965. In: PAKOWSKI, Z. MUJUMDAR, A. S.; STRUMILLO, C. **Theory and Application of Vibrated Beds and Vibrated Fluid Bed for**

**Drying Process.** Advances in Drying, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque, v. 1. p. 211-226, 1984.

CHLENOV, V. A.; MIKHAILOV, N. V. Vibrokipyashchii Sloi. 1972. In: STRUMILLO, C. PAKOWSKI, Z. Drying of Granular Products in Vibrofluidized Beds. **Drying '80**, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque, v.1, p 211-226, 1980.

COSTA, A. B. S.; FREIRE, F. B.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. Convective drying of regular mint leaves: analysis based on fitting empirical correlations, response surface methodology and neural networks. **Acta Scientiarum Technology**. v. 36. n. 2. p. 271-278. 2014.

COSTA, A. B. S.; FREIRE, F. B.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. Modelling drying pastes in vibrofluidized bed with inert particles. **Chemical Engineering and Processing**. v. 103. p. 1-11. 2016.

CRUZ, M. A. A.; Passos, M. L. FERREIRA, W. R. Final Drying of Whole Milk in Vibrated-Fluidized Beds. **Drying Technology**, Londres. v. 23, p. 2012-2037. 2005.

CUBILLOS, F.; REYES, A. Drying of Carrots in a Fluidized Bed. II. Desing of a Model Based on a Modular Neural Network Approach. **Drying Technology**. Londres. n. 7. v. 21. p. 1185-1196. 2003.

CUBILLOS, F.; VYHMEISTER, E.; ACUNA, G.; ALVAREZ, P. I. Rotary Dryer Control Using a Grey-Box Neural Model Scheme. **Drying Technology**. Londres. v. 29. p. 1820-1827. 2011.

DALEFFE, R. V. **Análise da presença do glicerol no comportamento fluidodinâmico de Leitos fluidizados e vibrofluidizados.** 2002. 236f. Tese de Doutorado em Engenharia Química – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

DALEFFE, R. V.; FREIRE, J. T. Analysis of the fluid-dynamics behavior of fluidized and vibrofluidized bed containing glycerol. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. Brasil, v.21, p 35-46, 2004.

DALEFFE, R. V.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. Drying of Paste in Vibrofluidized Beds: Effects if the Amplitude and Frequency of Vibration and of the Dimensionless Vibration Number on The bed Fluid-Dynamics. In: Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Symposium (IDS 2004). Brasil. **Anais do 14<sup>th</sup> IDS**. v. 4. p. 137-144. 2004. (1-CD ROM).

DALEFFE, R. V. **Contribuições para análise do comportamento fluidodinâmico de um leito vibrofluidizado.** 2005. 369 f. Tese de Doutorado em Engenharia Química – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2005.

DALEFFE, R. V.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. F. Drying of Paste in Vibro-fluidized Bed: Effect of the Amplitude and Frequency of Vibration. **Drying Techology**, Londres, n.9-11, v.23, p.1765-1781, 2005.

DALEFFE, R. V.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. Analysis of Particle Size Distributions on Flui Dynamic Behavior Segregation Patterns of Fluidized, vibrated and Vibrofluidized bed. **Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering**, v.2. p. 3-11. 2008.

DORNEY, J.; GINSBURG, A. S.; SIROYEDOV, V. I. Élelmezésipar. v.11. 411f. In: ERDESZ, K. **Hydrodynamic Studies on Vibrated Fluidzed Beds.** Power Handling e Precessing, Alemanha, n. 4. v. 2. p. 327-339. 1990.

- ESTIATI, I.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T.; AGUADO, R.; OLAZAR, M. Fitting performance of artificial neural networks and empirical correlations to estimate higher heating values of biomass. **Fuel**. v. 180. p. 377-383. 2016.
- ERDESZ K.; ORMOS, Z. Bed Expansion and Pressure Drop in Vibrofluidized Layers. **Hungria Journal of Industrial Chemistry**. Hungria. n. 1. v. 11. p. 169-177. 1983.
- ERDESZ, K. ORMOS, Z. Drying of Past-like Material in Vibro-fluidized Bed of Inert Packing. **Drying '85**, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque, v.1, p.177-182, 1986.
- ERDESZ, K.; MUJUMDAR, A. S. Hydrodynamic Aspects of Conventional and Vibrofluidized Beds – A Comparative Evaluation. **Powder Technology**, Holanda. v.46, p.167-172. 1986.
- ERDESZ, K.; MUJUMDAR, A. S.; RINGER, D. U. Hydrodynamic similarity of conventional and vibrated fluidized beds. **Drying '86**, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque, v.1, p.169-176, 1986.
- ERDESZ, K.; MUJUMDAR, A. S. Classification of Vibrated Equipment for Processing of Particulate Materials. **Drying '87**, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque, v. 1. p. 55-72, 1987.
- ERENTURK, S.; ENERTURK, K. Comparison of genetic algorithm and neural network approaches for the drying process of carrot. **Journal of Food Engineering**. v. 78. p. 905-912. 2007.
- FENG, C. L.; YU, A. B. Quantification of the Relationship between Porosity and Interparticle Forces for the Packing of Wet Uniform Spheres. **Journal of Colloid and Interface Science**. v. 231. p. 136-142. 2000.
- FINZER, J. R. D.; KIECKBUSCH, T. G. Secagem em Sistemas com Vibração. In: FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. **Tópicos Especiais em Secagem**, São Carlos-SP, UFSCar, 1992, v.1, p.87-127.
- FREIRE, J. T. Secagem de Pasta em Leito de Jorro, In: Freire, J. T.; Sartori, D. J. M. **Tópicos Especiais em Secagem**, Editora da UFSCar, São Carlos – SP, v.1, p. 41-85.
- FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, F. B. Secagem de pasta em leito de jorro. In: FREIRE, J. T.; SILVEIRA, A. M. **Fenômenos de transporte em sistemas particulados: fundamentos e aplicações**. São Carlos. Editora Suprema. 2009. p. 95-129.
- FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, F. B. Drying of solutions, slurries and pastes. In: EPSTEIN, N. and GRACE, J. R. **Spouted and spouted-fluid beds: fundamentals and applications**. Nova Iorque: Cambridge University Press. 2011, p. 206-221.
- 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**, Londres, v.30, p. 330-341, 2012.
- GALLAS, J. A. C.; HERRAMANN, H. J.; SOKOLOWSKI. S. Molecular Dynamics Simulation of powder Fluidization in Two Dimensions. **Physica A**. v. 189. p. 437-446. 1992.
- GARIM, M. M.; FREIRE. J. T. Leito Vibro-Fluidizado Aerado: Estudos Relacionados a Determinação de  $U_{mf}$  e  $\Delta P_{mvf}$ . In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química. 1994. São Paulo. **Anais do 10º COBEQ**, v. 1. 1994. p. 295-300. (1 CD-ROM).
- GARIM, M. M. **Estudo dos coeficientes de transferência de massa em leito fluidizada e vibro-fluidizado**. 1998. 140f. Tese de Doutorado em Engenharia Química – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1998.

- GELDART, D. Types of Gas Fluidization. **Powder Technology**. Holanda. v. 7. p. 285-292. 1973.
- GUPTA, R. G. Vibrated Beds of Powders: Part I – A Theoretical model for the Vibrated Bed. **Transaction of the Institution of Chemical Engineers**, v. 54. 1976.
- GUPTA, R.; MUJUMDAR, A. S. Aerodynamic and thermal characteristics of vibrated fluid beds: a Review. **Drying '80**, Hemisphere Publishing Corporation., Nova Iorque, v.1, p.141-150, 1980.
- HIMMELBLAU, D. M. Accounts of Experiences in the Application of Artificial Neural Networks in Chemical Engineering. **Industrial and Engineering Chemistry Research**. v. 47. p. 5782-5796. 2008.
- IYER, S. R.; DRZAL, L. T. Behavior of Cohesive Powder in Narrow-Diameter Fluidized Beds. **Powder Technology**. Holanda. v. 57. p. 127-133. 1989.
- JARAIZ, E.; KIRUMA, S.; LEVENSPIEL, O. Vibrating beds of fine particles: estimation of interparticle forces from expansion and pressure drop experiments. **Powder Technology**. Holanda. v. 72. p. 23-30. 1992.
- JIN, H.; ZHANG, J.; ZHANG, B. The Effect of Vibration on Bed Voidage Behaviors in Fluidized Beds with Large Particles. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. Brasil. n. 3. v. 24, p. 389-397. 2007.
- JINESCU, G.; TABRENCU, C.; IONESCU, E.; PETRESCU, M.; JINESCU, C. Hydrodynamic Aspects at Vibrated Fluidized Drying of Polydisperse Powdery Materials. **Drying '2000**, Proceedings of 12<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS '2000), Noodrwijkherhout, The Netherlands. 2000. (1 CD-ROM).
- KAGE, H.; OBA, M.; ISHIMATSU, H. O.; MATSUNO, Y. The effect of frequency and amplitude on the powder coating of fluidizing particles in a vibro-fluidized bed. **Advanced Powder Technology**. n. 1. v. 10. p. 77-87. 1999.
- KROLL, W. Über das Verhalten von Schuttgut in lotrecht schwingenden Gefässen. Forschung Auf Dem Gebiete Des Ingenieurwesens, Forschung Im Ingenieurwesen. Dusseldorf, Alemanha. n.2, v.20, p.2-15, 1954. In: THOMAS, B.; LUI, Y. A.; MASON, M; O.; SQUIRES, A. M. Vibrated Bed: New Tools for Heat Transfer. **Chemical Engineering Progress**. n.6, v.84, p.65-75, 1988.
- KROLL, W. Fließerscheinungen an Haufwerken in schwingenden Gefässen. Chemie Ingenieur Technik. Weinheim, Alemanha. n. 1. v. 27, p. 33-38, 1955. In: THOMAS, B.; LUI, Y. A.; MASON, M; O.; SQUIRES, A. M. Vibrated Bed: New Tools for Heat Transfer. **Chemical Engineering Progress**. n.6, v.84, p.65-75, 1988.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**, 2 ed. Estados Unidos. Butterworth-Heinemann. 1991. 491p.
- LIANG X.; ZHOU, Y.; ZOU, L.; KONG, J. WANG, J.; ZHOU, T. Fluidization behavior of binary iron-containing nanoparticles mixtures in a vibro-fluidized bed. **Powder Technology**, Holanda. v. 304, p-101-107, 2016.
- LIMA, R. A. B.; FERREIRA, M. C. Fluidized and Vibrofluidized shallow beds of fresh leaves. **Particuology**. China. v.9, p. 139-147. 2011.
- MALHOTRA, K.; LAW-KWET-CHEONG, L.; MUJUMDAR, A. S. Pressure Drop Characteristics for Vibrated Beds of Dry and Sticky Particles. **Powder Technology**, Holanda, v.39, p. 101-105. 1984.

- MAROGLOU, A.; NIENOW, A. W. Fluidised bed granulation: a procedure for determining its feasibility and suitable operating parameters. **I. Chem. E. Symp. Ser.** v. 91. p. 15-25. 1985.
- MARRING, E.; HOFFMANN, A. C.; JANSSEN, L. P. B. M. The effect of vibration on the fluidization behavior of some cohesive powder. **Powder Technology.** Holanda. v. 79. p. 1-10. 1994.
- MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted bed.** 1 ed. Academic Press, Nova Iorque, 1974, 304 f.
- MAWATARI, Y.; KOIDE, T.; TATEMOTO, Y.; UCHIDA, S.; NODA, K. Effect of particle diameter on fluidization under vibration. **Powder Technology.** Holanda. v. 123. p. 69-74. 2002.
- MCLAUGHLIM, L. J.; RHODES, M. J. Prediction of fluidized bed behavior in the presence of liquid bridges. **Powder Technology.** Holanda. v. 114. p. 213-223. 2001.
- MEILI, L. **Contribuição aos Estudos da Fluidodinâmica e da Secagem de Pastas em Leitos Fluidizados e Vibrofluidizado.** 2009. 227 f. Tese de Doutorado em Engenharia Química – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.
- MEILI, L.; DALEFFE, R. V.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. Analysis of the influence of Dimensionless Vibration Number on the Drying of Paste in Vibrofluidized Bed. **Drying Technology.** Londres. v. 28. p. 402-411. 2010.
- MEILI, L.; FREIRE, F. B.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. Fluid Dynamics of Vibrofluidized Beds during the Transient Period of Water Evaporation and Drying Solutions. **Chemical Engineering and Technology.** Alemanha, n.10. v. 35. p. 1803-1809. 2012.
- MEILI, L.; DALEFFE, R. V.; FREIRE, J. T. Fluid Dynamic of Fluidized and Vibrofluidized bed Operating with Geldart C Particles. **Chemical Engineering and Technology.** Alemanha, n.9, v.35, p. 1649-1656, 2012.
- MOREIRA, D. A.; PASSOS, M. L. Estudo Experimental sobre a influência de forças coesivas no comportamento de leitos vibro-fluidizados. **Science and Engineering Journal.** Brasil. v. 15. n. 2. p. 21-16. 2005.
- MORI, S.; YAMAMOTO, A.; IWATA, S.; HARUTA, T.; YAMADA, I. Vibro-fluidization of Group-c Particles and its industrial applications. **Advances in Fluidization Engineering.** Nova Iorque. n. 276. v. 86. p. 88-94. 1990.
- MUSHTAYEV, V. I.; KOROTKOV, B. M.; CHEVILENKO, V. A.; EFIMOV, M. G.; PLANOVSKI, A. N. Teoret. Osnovy khim. 1972. In: STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z. Drying of Granular Products in Vibrofluidized Bed. **Drying '80,** Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque, v. 1, p.211-226. 1980.
- MUJUMDAR, A. S. Aerodynamic characteristics of a vibrated bed of particles. **Drying '84.** Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque, v. 1. p. 178-185. 1984.
- MUJUMDAR, A. S. Principles, Classification, and Selection of Dryer. In: **Handbook of Industrial Drying.** 3. ed. Taylor e Francis Group. 2006. p. 4-31.
- NASCIMENTO, B. S. **Análise do efeito da composição química na secagem de pasta em leito de jorro.** 2013. 112 f. Tese de Doutorado em Engenharia Química – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

- NASCIMENTO, B. S.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Neuronal and Grey Modelling of Milk Drying in Spouted Bed. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 91. p. 1815-1821. 2013.
- NOVY, M. G.; KIECKBUSH, T. G. 1988. In: MEILI, L. **Contribuição aos Estudos da Fluidodinâmica e da Secagem de Pastas em Leitos Fluidizados e Vibrofluidizado**. 2009. 227 f. Tese de Doutorado em Engenharia Química – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.
- NUNES, J. F.; ALCANTARA, F. C. A.; MORIS, V. A. S.; ROCHA, S. C. S. Fluid dynamics and coating of sodium bicarbonate in a vibrofluidized bed. **Chemical Engineering and Processing**. v. 52. P. 34-40. 2012.
- OLIVEIRA JR., A. B. de. **Estudo da transferência de calor e massa no processo de secagem em leito vibro-fluidizado**. 2003. 202f. Tese de Doutorado em Engenharia Química. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2003.
- PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S.; STRUMILLO, C. Theory and Application of Vibrated Beds and Vibrated Fluid Beds for Drying Process. In: **Advances in Drying**, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque, v. 1, p. 211-226.
- PAN, Y. K.; PANG, J. Z.; MUJUMDAR, A. S.; KUDRA, T. Drying of Photosynthetic Bacteria in a vibrated fluid bed of solid carriers. **Drying Technology**. Londres. n. 1 e 2. v. 13. p. 395-404. 1995.
- PAN, Y. K.; LI, J. G.; ZHAO, L. J.; YE, W. H.; MUJUMDAR, A. S.; KUDRA, T. Performance Characteristics of the Vibrated Fluid Bed of Inert Particles for Drying of Liquids Feeds. **Drying Technology**. Londres. n. 8. v. 19. p. 2003-2018. 2001.
- PASSOS, M. L.; MUJUMDAR, A. S.; Effect of cohesive forces on fluidized and spouted beds of wet particles. **Powder Technology**. Holanda. v. 110. p. 222-238. 2000.
- PERAZINNI, H.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Difusão da umidade na secagem de partículas porosas em leito vibrofluidizado. In: XXXVI ENEMP – Congresso Brasileiro de Sistema Particulados. Maceió. **Anais ENEMP 2013 – Volume 2**. Maceió: Ufal. 2013. p. 203-213. Disponível em: < <http://evento.ufal.br/enemp2013/anais/ANAIS%20ENEMP%202013%20-%20VOLUME%202.pdf>>.
- RINGER, D. U.; MUJUMDAR, A. S.; Analysis of aerodynamics and heat-transfer in vibrofluidized beds. **Drying Technology**. Nova Iorque. n. 4. v. 2. p. 449-470. 1984.
- ROSANOVA, AL. H.; MAIA, G. D.; FREIRE, F. B.; FERREIRA, M. C.; A Neural Based Modeling Approach for Drying Kinetics Analysis of Mint Branches and Their Fractions (Leaves and Stems). **Advances in Chemical Engineering and Science**. Inglaterra. v. 7. p.154-174. 2017.
- SANTANA, J. D. A.; CHARBEL, A. L. T.; PASSOS, M. L.; MASSARANI, G. Effect of interparticles forces on spouted bed flow behavior. In: **Proceeding of the Inter-American Drying Conference**, São Paulo, p. 135-142, 1997.
- SEVILLE, J. P. K. Particle Cohesion in Gas/Solid Fluidisation. In: BRISCOE, B. J.; ADAMS, M. J. **Tribology in Particulate Technology**. Inglaterra: Adam Higler, Bristol and Philadelphia. 1987. p. 173-190.
- SEVILLE, J. P. K.; CLIFT, R. The effect of thin liquid layers on fluidization characteristics. **Powder Technology**. Holanda. v. 37. P. 117-129. 1984.

- SEVILLE, J. P. K.; WILLET, C. D.; KNIGHT, P. C. Interparticle forces in fluidization: a review. **Powder Technology**. Holanda. v. 113. p. 261-268. 2000.
- SHAH, R. M.; GOYEL, S. K. Drying Characteristics of Tea Fluidized on a Vibrating Bed (Part I). In: Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Drying Symposium (IDS '80). Montreal, Canada **Drying '80**. Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque, v. 2. p. 176-181. 1980.
- SILVA, A. **Análise da secagem de Limão Tahiti (*Citrus Latifolia* – TANAKA) em fatias e de suas frações: Epicarpo, Mesocarpo e Endocarpo**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.
- STRUMILLO, C. PAKOWSKI, Z. Drying of Granular Products in Vibrofluidized Bed. **Drying '80**, Hemisphere Publishing Corporation, Nova Iorque, v.1, p. 211-226. 1980.
- TARBOS, G. I.; MAZZONE, D.; PFEFFER, R. Measurement of surface viscosities using a dilatometer. The **Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 62. p. 884-887. 1984.
- THOMAS, B.; LUI, Y. A.; MASON, M; O.; SQUIRES, A. M. Vibrated Bed: New Tools for Heat Transfer. **Chemical Engineering Progress**. n.6, v.84, p.65-75, 1988.
- VALVERDE, J. M.; CASTELLANOS, A.; WATSON, P. K. The effect of particle size on interparticle adhesive forces for small loads. **Powder Technology**. Holanda. v. 118. p. 236-241. 2001.
- WALTMAN, R. M. Reology, v. 3. Academic Press, Nova Iorque. 1960. In: OLIVEIRA, W. P. **Estudo da Secagem de Pasta em Leito de Jorro Cônico**. 1996. 202f. Tese de Doutorado em Engenharia Química. Centro de Ciência Exata e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1996.
- WATSON, P. K.; VALVERDE, J. M.; CASTELLANOS, A. Te tensile strenght and free volume of cohesive powder compressed by gas flow. **Powder Technology**. Holanda. v. 115. p. 45-50. 2001.
- XU, C.; ZHU, J. Parametric study of fine particle fluidization under mechanical vibration. **Powder Technology**. Holanda. v. 161. p. 135-144. 2006.
- YOUSSEFI, S.; EMAM-DJOMEH, Z.; MOUSAVI, S. M. Comparion of Artificial Neural Network (ANN) and Response Surface Methodology (RSM) in the Prediction of Quality Parameters of Spray- Dried Pomegranate Juice. **Drying Technology**. Londres. v. 27. p. 910-917. 2009.
- YU, A. B.; FENG., C. L.; ZOU, R. P. YANG. R. Y. On the Relationship between porosity and interparticle forces. **Powder Technology**. Holanda. v. 130. p. 70-76. 2003.
- ZABRODSHYI, S. S.; ZAMNIUS, I. L.; MALYUKOVICH, S. A. Heat Transfer by a Layer of thin-Dispersed Material Fluidized by a Gas Flow or Vibrationsl Superposition. *Inzhenermo – Fizicheskii Zhurnal*. v. 13, n. 3. 448f. 1968. In: ERDESZ, K. **Hydrodynamic Studies on Vibrated Fluidzed Beds**. Power Handling e Precessing, Alemanha, n. 4. v. 2. p. 327-339. 1990.