

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

**ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA NO
PROCESSO DE SECAGEM EM LEITO VIBRO-FLUIDIZADO**

Antonio Batista de Oliveira Júnior

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de Concentração e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. José Teixeira Freire

São Carlos – SP

2003

**ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA NO
PROCESSO DE SECAGEM EM LEITO VIBRO-FLUIDIZADO**

“Toda a arte de ensinar é apenas a arte de acordar a curiosidade natural nas mentes jovens, com o propósito de serem satisfeitas mais tarde”

Anatole France

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

O48et

Oliveira Júnior, Antonio Batista de.

Estudo da transferência de calor e massa no processo de secagem em leito vibro-fluidizado / Antonio Batista de Oliveira Júnior. -- São Carlos : UFSCar, 2003.
202 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2003.

1. Processo de secagem. 2. Calor - transmissão. 3. Massa – transferência. 4. Leito vibro-fluidizado. I. Título.

CDD: 660.28426 (20^a)

“São fúteis e cheias de erros as ciências que não nasceram da experimentação, mãe de todo o conhecimento”

Leonardo da Vinci

“Achar que o mundo não tem um Criador é o mesmo que afirmar que um dicionário é o resultado de uma explosão numa tipografia”

Benjamin Franklin

Dedico este trabalho aos meus pais, Antonio e Helena, ao meu irmão Heleno e à minha noiva Márcia, com muito amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Teixeira Freire, pelas orientações, conselhos e estímulo à pesquisa durante o desenvolvimento deste trabalho, pela sua carinhosa amizade e pela oportunidade que me deu de poder trabalhar ao seu lado que é um exemplo de mestre e profissional.

Aos meus pais Antonio Batista de Oliveira e Helena Silva de Oliveira, pelo apoio incondicional, pela abdicação de seus prazeres em prol dos meus, pelo amor e pelo carinho destinados a minha pessoa, eles que são exemplos de retidão, companheirismo e de pais.

Ao meu irmão Heleno Batista de Oliveira, pelo apoio, incentivo e pelos conselhos dados em todos os momentos desta minha caminhada.

À minha noiva Márcia Karsinskas, pelo amor, pelo carinho e dedicação à minha pessoa, ela que é um exemplo de companheira, amiga fiel e pelo apoio em todos os momentos vividos ao longo destes anos.

À Prof^a. Dr^a. Ana Maria da Silveira, pelas sugestões e contribuições dadas neste trabalho e em especial pelas correções efetuadas que muito contribuíram para a realização deste.

Aos Profs. Dr^a. Maria do Carmo Ferreira, Dr. Ronaldo Guimarães Corrêa e Dr. Dermeval José Mazzini Sartori, pelas contribuições, sugestões e amizade.

Aos colegas Roger Valeri Daleffe, Célio Fernando dos Santos Camargo, Manoel Marcelo do Prado e Margarete Martins Pereira pelo auxílio e contribuições dadas na realização deste trabalho.

Aos funcionários do DEQ/UFSCar.

Aos colegas e amigos do DEQ/UFSCar.

A Marcelo Silveira Bachelos e sua esposa, pelos momentos de convivência, amizade e em especial ao amigo Marcelo pelas contribuições e discussões que muito enriqueceram o meu trabalho.

Aos amigos Hallen Pinto Ferreira e José Marcelo Cangemi, ex-companheiros de empresa, que juntos lutamos para alcançar os nossos objetivos, pelo apoio e incentivo ao longo de toda esta caminhada.

Aos colegas de mestrado e doutorado da área de Sistemas Particulados, Fabíola, Tatiana, Cristiane, Leonardo, Alexandre, Alexei, Nivaldo e Marcos pela amizade e momentos de descontração vividos neste período.

À CAPES e ao PRONEX pelo suporte financeiro que viabilizaram a realização deste trabalho.

RESUMO

O estudo do processo de secagem nos leitos fluidizados e vibro-fluidizados tem merecido amplo destaque por parte de vários pesquisadores, visto o conjunto de vantagens que estes oferecem comparativamente aos demais equipamentos. E, dentro deste contexto, este trabalho faz uma abordagem ampla do processo de secagem em leitos fluidizados e vibro-fluidizados.

Neste trabalho foram realizados estudos que contemplam os seguintes tópicos:

a) estudos fluidodinâmicos para as partículas de alumina e sílica-gel, em leitos fluidizados e vibro-fluidizados, onde as influências de diversas variáveis, tais como: frequência e amplitude vibracional e conseqüentemente o adimensional de vibração, altura do leito de partículas e o diâmetro de partículas no comportamento fluidodinâmico de ambos os leitos foram analisadas. Paralelamente, um estudo foi feito analisando o comportamento fluidodinâmico dos leitos, utilizando-se para isso o desvio padrão das medidas de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar. Os resultados obtidos mostraram que em ambos os leitos o adimensional de vibração teve uma forte influência no comportamento fluidodinâmico das partículas e que tanto o aumento da altura de partículas no leito, bem como, o diâmetro das partículas tiveram grandes influências nas curvas características obtidas;

b) a determinação experimental das isotermas de equilíbrio para as partículas de alumina e sílica-gel, utilizando o método estático e o ajuste do melhor modelo foi feito através da discriminação das equações de isotermas previstas na literatura por estimação não linear de parâmetros. Os resultados mostram que a equação de Sabbah, foi a que melhor se ajustou aos pontos experimentais para ambos os conjuntos de partículas de alumina e sílica-gel;

c) a

determinação experimental da cinética de secagem para as partículas de alumina e sílica-gel em leito fixo e camada fina, sendo que o ajuste do melhor modelo foi feito através da discriminação das equações semi-empíricas previstas na literatura para a cinética de secagem, por estimação não linear de parâmetros. Os resultados mostram que a equação de Mancini foi a que melhor se ajustou aos pontos experimentais tanto para as partículas de alumina quanto para as partículas de sílica-gel; d) a determinação experimental dos coeficientes de transferência de calor e massa em leitos fluidizados e vibro-fluidizados, utilizando a metodologia proposta por Kmiec (1975). Os resultados obtidos, dentro do intervalo de variáveis estudado, mostram que os coeficientes de transferência de calor e massa para os leitos vibro-fluidizados não aumentaram significativamente quando comparados aos valores obtidos nos leitos fluidizados; e) e a estimação dos perfis de umidade e temperatura dos sólidos, através do modelo matemático proposto por Massarani e Silva Telles (1992), utilizando os coeficientes de transferência de calor e massa determinados experimentalmente. As respostas obtidas mostram que o modelo matemático não apresentou bons resultados para os perfis de umidade dos sólidos, mas, apresentou resultados razoáveis para os perfis de temperatura dos sólidos, dentro do intervalo de variáveis avaliado.

ABSTRACT

Drying processes in fluidized and vibro-fluidized beds are nowadays being widely investigated in the literature, because such beds offer many advantages over other types of dryers. The purpose of this work is to contribute for the research in this area by presenting an extensive investigation of the drying process in fluidized and vibro-fluidized beds.

The following topics were investigated in this work:

a) fluid dynamic studies in fluidized and vibrofluidized beds were carried out using particles of alumina and silica-gel as inerts. The effects of variables such as the frequency and vibration amplitude (which are combined in a dimensionless vibration number), height of the bed and particle diameters on the fluid dynamic behavior of both beds have been analyzed. Simultaneously, an analysis of the fluid dynamic behavior for these beds was carried out using measurements of standard deviations of the pressure drops in the beds as a function of the superficial gas velocity. The results show that in both beds the dimensionless vibration number has a strong influence on the fluid dynamic behavior of the bed of particles. Besides, the increase in the height of particles in the bed, as well as in the particle diameters affects significantly its characteristic curves;

b) equilibrium isotherms for alumina and silica-gel particles were obtained experimentally using the static method. Some equations for equilibrium isotherms available in the literature were compared to experimental data and the best fitted model was obtained using a technique based on non-linear estimation of the parameters. The results show that the equation of Sabbah provided the best fitting for both particles of alumina and silica-gel;

c) the drying kinetics for alumina and silica-gel were obtained from experimental data for the drying of a thin layer of particles in a fixed bed. The best model for the drying kinetics came from a semi-empirical equations presented in the literature, using a non-linear estimation of parameters technique. The results show that the equation from Mancini provided the best predictions for experimental data of alumina and silica-gel;

d) heat and mass transfer coefficients in the fluidized and vibrofluidized beds were estimated using the methodology proposed by Kmiec (1975). In the range of variables investigated, the results show that the heat and mass transfer coefficients for the vibrofluidized beds have not increased significantly as compared to the values obtained in the fluidized beds;

e) the moisture content and temperature profiles of the particles were estimated using the mathematical model proposed by Massarani and Silva Telles (1992) with the heat and mass transfer coefficients obtained experimentally. For the range of conditions investigated, the mathematical model has not provided good predictions for the moisture content profiles, but in the other hand, it provided reasonable good predictions for the temperature profiles of the particles.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	v
SUMÁRIO.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE QUADROS E TABELAS.....	xxv
NOMENCLATURA.....	xxxiii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 – O estudo dos leitos vibro-fluidizados.....	4
2.1.1 – Regimes de operação nos leitos vibro-fluidizados.....	6
2.1.2 – A fluidodinâmica dos leitos fluidizados e vibro-fluidizados.....	7
2.1.3 – Velocidade de vibro-fluidização incipiente.....	15
2.1.4 – Queda de pressão na vibro-fluidização incipiente.....	20
2.1.5 – Análises do comportamento fluidodinâmico dos leitos fluidizado e vibro-fluidizado utilizando curvas de desvio padrão.....	22
2.1.6 – Porosidade nos leitos fluidizados e vibro-fluidizados.....	25
2.2 – Isotermas de equilíbrio.....	27
2.3 – Cinética de secagem.....	30

2.3.1 – Secagem em camada fina.....	33
2.3.2 – O processo de secagem em leitos fluidizados e vibro-fluidizados.....	35
2.3.2.1 – Secagem nos leitos fluidizados.....	36
2.3.2.2 – Secagem nos leitos vibro-fluidizados.....	38
2.4 – Transferência de calor e massa nos leitos fluidizados e vibro-fluidizados.....	40
CAPTÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
3.1 – Materiais.....	50
3.2 – Equipamentos.....	51
3.2.1 – Isotermas de equilíbrio.....	52
3.2.2 – Cinética de secagem.....	53
3.2.3 – Leito vibro-fluidizado.....	55
3.3 – Metodologia experimental.....	58
3.3.1 – Fluidodinâmica.....	58
3.3.2 – Isotermas de equilíbrio.....	59
3.3.3 – Cinética de secagem.....	61
3.3.3.1 – Secagem em camada fina.....	61
3.3.3.2 – Cinética de secagem nos leitos fluidizados e vibro- fluidizados.....	62
3.3.3.3 – Determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa.....	64
3.3.3.4 – Estimação dos perfis de umidade e temperatura do sólido.....	66
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	68

4.1 – Fluidodinâmica.....	68
4.1.1 – Influência da altura de partículas no comportamento fluidodinâmico do leito.....	75
4.1.2 – Influência da amplitude no comportamento fluidodinâmico do leito...81	
4.1.3 – Influência do diâmetro das partículas no comportamento fluidodinâmico do leito.....	84
4.1.4 – Influência do adimensional de vibração na fluidodinâmica do leito....	87
4.2 – Isotermas de equilíbrio.....	91
4.3 – Cinética de secagem.....	96
4.4 – Determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa	108
4.4.1 – Determinação experimental dos coeficientes de transferência de calor e massa.....	108
4.4.2 – Simulação dos perfis de umidade e temperatura do sólido.....	113
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	119
5.1 – Fluidodinâmica.....	119
5.2 – Isotermas de equilíbrio.....	121
5.3 – Cinética de secagem.....	122
5.4 – Coeficientes de transferência de calor e massa e simulação.....	122
CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES.....	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126

APÊNDICE A – DADOS EXPERIMENTAIS PARA AS PARTÍCULAS DE ALUMINA E SÍLICA-GEL REFERENTES À FLUIDODINÂMICA.....	136
APÊNDICE B – DADOS EXPERIMENTAIS NO EQUILÍBRIO PARA AS PARTÍCULAS DE ALUMINA E SÍLICA-GEL REFERENTES ÀS ISOTERMAS DE EQUILÍBRIO.....	156
APÊNDICE C – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE RESÍDUOS E DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS PARA AS PARTÍCULAS DE ALUMINA E SÍLICA-GEL REFERENTES ÀS EQUAÇÕES DE ISOTERMA DE EQUILÍBRIO.....	163
APÊNDICE D – DADOS EXPERIMENTAIS DA CINÉTICA DE SECAGEM DAS PARTÍCULAS DE ALUMINA E SÍLICA-GEL.....	170
APÊNDICE E - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE RESÍDUOS E DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS PARA AS PARTÍCULAS DE ALUMINA E SÍLICA-GEL REFERENTES ÀS EQUAÇÕES DE CINÉTICA DE SECAGEM NO LEITO FIXO.....	189
APÊNDICE F – DADOS EXPERIMENTAIS DA CINÉTICA DE SECAGEM DAS PARTÍCULAS DE ALUMINA E SÍLICA-GEL NOS LEITOS FLUIDIZADO E VIBRO-FLUIDIZADO.....	198

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1:** Exemplos de curvas características para os leitos fluidizados (a) e para os leitos vibro-fluidizados (b, c, d), (Strumillo e Pakowski, 1980).....8
- Figura 2.2:** Curvas características de fluidização em função da altura do leito para partículas de vidro – $d_p = 700\mu\text{m}$, $f = 10\text{Hz}$, $A = 1,98 \times 10^{-2}\text{m}$. (Camargo, 1998).....9
- Figura 2.3:** Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado na frequência e no adimensional de vibração para partículas vidro, $d_p = 700\mu\text{m}$, $H = 7,0 \times 10^{-2}\text{ m}$ e $A = 1,98 \times 10^{-3}\text{m}$. (Camargo, 1998)..... 10
- Figura 2.4:** - Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado e sua respectiva réplica – esferas de vidro, $d_p = 1,545 \times 10^{-3}\text{m}$. (Daleffe, 2002)..... 11
- Figura 2.5:** - Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado e sua respectiva réplica – esferas de vidro, $d_p = 1,545 \times 10^{-3}\text{m}$, $\Gamma=1,0$ e $A = 3,0 \times 10^{-3}\text{m}$. (Daleffe, 2002)..... 11
- Figura 2.6:** Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado e sua respectiva réplica na presença de glicerol esferas de vidro, $d_p = 1,545 \times 10^{-3}\text{m}$, $\varphi = 0,0010$. (Daleffe, 2002)..... 12
- Figura 2.7:** Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado e sua respectiva réplica na presença de glicerol – esferas de vidro, $d_p = 1,545 \times 10^{-3}\text{m}$, $\Gamma = 1,0$; $\varphi = 0,0010$. (Daleffe, 2002)..... 13

Figura 2.8: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado na amplitude de vibração. (Erdész <i>et al.</i> , 1984).....	14
Figura 2.9: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado no diâmetro das partículas. (Daleffe, 2002).....	15
Figura 2.10: Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para um leito fluidizado – Estimativa da velocidade de mínima fluidização.....	16
Figura 2.11: U_{mvf}/U_{mf} em função do adimensional de vibração parametrizado na altura do leito de partículas, (Gupta e Mujumdar, 1980a).....	17
Figura 2.12: U_{mm}/U_{mf} em função do adimensional de vibração parametrizado no tipo de partículas, (Gupta e Mujumdar, 1980a).....	18
Figura 2.13: Desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado. $A = 1,38 \times 10^{-3} \text{m}$, $d_p = 1,1 \times 10^{-3} \text{m}$. (Garim, 1998).....	23
Figura 2.14: Desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado na altura do leito de partículas para o leito fluidizado. $d_p = 1,1 \times 10^{-3} \text{m}$. (Garim, 1998).....	24
Figura 2.15: Porosidade do leito de partículas em função do adimensional de vibração parametrizado na frequência de vibração. (Pakowski <i>et al.</i> , 1984).....	26
Figura 2.16: Curva típica de taxa de secagem	32
Figura 2.17: Transferência de massa na secagem de uma partícula em um leito fluidizado. (Vaneck <i>et al.</i> , 1966).....	37
Figura 2.18: Umidade adimensional em função do tempo parametrizado no adimensional de vibração para grãos de trigo, (Han <i>et al.</i> , 1991).....	40

Figura 2.19: Umidade adimensional em função do tempo parametrizado no adimensional de vibração para partículas de BYN, (Han <i>et al.</i> , 1991).....	40
Figura 3.1: Recipiente cilíndrico para determinação das condições de equilíbrio...	52
Figura 3.2: Esquema geral do secador em camada fina.....	53
Figura 3.3: Esquema da célula de secagem utilizada na secagem em camada fina.	54
Figura 3.4: Esquema geral do leito vibro-fluidizado.....	56
Figura 4.1: Queda de pressão em função da velocidade do ar para o leito fluidizado e respectiva réplica. Partículas de alumina, $d_p = 3,095 \times 10^{-3} \text{ m}$; H = 9,0 cm.....	69
Figura 4.2: Queda de pressão em função da velocidade ar para o leito fluidizado e respectiva réplica. Partículas de sílica-gel, $d_p = 2,595 \times 10^{-3} \text{ m}$; H = 11,0 cm..	70
Figura 4.3: Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado e respectiva réplica. Partículas de alumina, $d_p = 3,095 \times 10^{-3} \text{ m}$; H = 9,0 cm.....	71
Figura 4.4: Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado e respectiva réplica. Partículas de sílica-gel, $d_p = 2,595 \times 10^{-3} \text{ m}$; H = 11,0 cm.....	71
Figura 4.5: Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado e respectiva réplica. Partículas de alumina, $d_p = 3,095 \times 10^{-3} \text{ m}$; H = 9,0 cm; A = 2,0 mm.....	72
Figura 4.6: Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado e respectiva réplica. Partículas de sílica-gel, $d_p = 2,595 \times 10^{-3} \text{ m}$; H = 11,0 cm; A = 2,0 mm.....	73

- Figura 4.7:** Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado e respectiva réplica. Partículas de alumina, $d_p = 3,095 \times 10^{-3} \text{ m}$; $H = 9,0 \text{ cm}$; $A = 2,0 \text{ mm}$74
- Figura 4.8:** Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado e respectiva réplica. Partículas de sílica-gel, $d_p = 2,595 \times 10^{-3} \text{ m}$; $H = 11,0 \text{ cm}$; $A = 2,0 \text{ mm}$74
- Figura 4.9:** Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado parametrizado na altura do leito de partículas. Partículas de alumina $d_p = 3,095 \times 10^{-3} \text{ m}$. $\Gamma = 0,0$76
- Figura 4.10:** Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado parametrizado na altura do leito de partículas. Partículas de sílica-gel $d_p = 2,595 \times 10^{-3} \text{ m}$. $\Gamma = 0,0$76
- Figura 4.11:** Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado parametrizado na altura do leito de partículas de alumina, $d_p = 3,0955 \times 10^{-3} \text{ m}$. $\Gamma = 0,0$77
- Figura 4.12:** Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado parametrizado na altura do leito de partículas de sílica-gel. $d_p = 2,595 \times 10^{-3} \text{ m}$. $\Gamma = 0,0$78
- Figura 4.13:** Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar no leito vibro-fluidizado parametrizado na altura do leito de partículas de alumina. $d_p = 3,095 \times 10^{-3} \text{ m}$; $A = 2,0 \text{ mm}$79
- Figura 4.14:** Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado parametrizado na altura do leito de partículas de sílica-gel. $d_p = 2,595 \times 10^{-3} \text{ m}$. $A = 2,0 \text{ mm}$79

- Figura 4.15:** Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado parametrizado na altura do leito de partículas de alumina.
 $d_p = 3,095 \times 10^{-3} \text{ m}$. $A = 2,0 \text{ mm}$80
- Figura 4.16:** Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado parametrizado na altura do leito de partículas de sílica-gel.
 $d_p = 2,595 \times 10^{-3} \text{ m}$. $A = 2,0 \text{ mm}$81
- Figura 4.17:** Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado parametrizado na amplitude vibracional. Partículas de alumina. $d_p = 3,095 \times 10^{-3} \text{ m}$. $H = 7,0 \text{ cm}$82
- Figura 4.18:** Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado parametrizado na amplitude vibracional. Partículas de sílica-gel. $d_p = 2,595 \times 10^{-3} \text{ m}$. $H = 7,0 \text{ cm}$82
- Figura 4.19:** Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado parametrizado na amplitude vibracional. Partículas de alumina. $d_p = 3,095 \times 10^{-3} \text{ m}$. $H = 7,0 \text{ cm}$83
- Figura 4.20:** Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado parametrizado na amplitude vibracional. Partículas de sílica-gel. $d_p = 2,595 \times 10^{-3} \text{ m}$. $H = 7,0 \text{ cm}$84
- Figura 4.21:** Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado e vibro-fluidizado parametrizado no diâmetro das partículas de sílica-gel. $H = 9,0 \text{ cm}$ – $A = 2,0 \text{ mm}$86
- Figura 4.22:** Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado e vibro-fluidizado parametrizado no diâmetro das partículas de sílica-gel. $H = 9,0 \text{ cm}$ – $A = 2,0 \text{ mm}$86

- Figura 4.23:** Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado e vibro-fluidizado parametrizado no adimensional de vibração. Partículas de alumina. $d_p = 3,095$ mm. $H=7,0$ cm.....88
- Figura 4.24:** Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para os leitos fluidizado e vibro-fluidizado parametrizado no adimensional de vibração. Partículas de sílica-gel. $d_p = 2,595$ mm. $H= 7,0$ cm.....88
- Figura 4.25:** Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para os leitos fluidizado e vibro-fluidizado parametrizado no adimensional de vibração. Partículas de alumina. $d_p = 3,095$ mm. $H=7,0$ cm.....89
- Figura 4.26:** Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para os leitos fluidizado e vibro-fluidizado parametrizado no adimensional de vibração. Partículas de sílica-gel. $d_p = 2,595$ mm. $H=7,0$ cm.....89
- Figura 4.27:** Umidade de equilíbrio em função da umidade relativa para as partículas de alumina e sílica-gel - $T = 30^\circ\text{C}$94
- Figura 4.28:** Umidade de equilíbrio em função da umidade relativa para as partículas de alumina e sílica-gel - $T = 45^\circ\text{C}$95
- Figura 4.29:** Umidade de equilíbrio em função da umidade relativa para as partículas de alumina e sílica-gel - $T = 60^\circ\text{C}$95
- Figura 4.30:** Umidade adimensional em função do tempo para as partículas de alumina. $T = 100^\circ\text{C}$ e $U = 1,0$ m/s.....98
- Figura 4.31:** Umidade adimensional em função do tempo para as partículas de alumina. $T = 60^\circ\text{C}$ e $U = 2,0$ m/s.....98
- Figura 4.32:** Umidade adimensional em função do tempo para as partículas de sílica-gel. $T = 100^\circ\text{C}$ e $U = 1,0$ m/s.....99

Figura 4.33: Umidade adimensional em função do tempo para as partículas de sílica-gel. $T = 60^{\circ}\text{C}$ e $U = 0,5 \text{ m/s}$	99
Figura 4.34: Umidade adimensional em função do tempo parametrizada na velocidade superficial do ar de secagem, para as partículas de alumina. $T = 80^{\circ}\text{C}$	100
Figura 4.35: Umidade adimensional em função do tempo parametrizada na velocidade superficial do ar de secagem para as partículas de sílica-gel. $T=80^{\circ}\text{C}$	101
Figura 4.36: Umidade adimensional em função do tempo parametrizada na velocidade superficial do ar de secagem para as partículas de alumina. $T=60^{\circ}\text{C}$	101
Figura 4.37: Umidade adimensional em função do tempo parametrizada na velocidade superficial do ar de secagem para as partículas de alumina. $T=100^{\circ}\text{C}$	102
Figura 4.38: Umidade adimensional em função do tempo parametrizada na velocidade superficial do ar de secagem para as partículas de sílica-gel. $T = 60^{\circ}\text{C}$	102
Figura 4.39: Umidade adimensional em função do tempo parametrizada na velocidade superficial do ar de secagem para as partículas de sílica-gel. $T = 100^{\circ}\text{C}$	103
Figura 4.40: Umidade adimensional em função do tempo parametrizada na temperatura do ar de secagem para as partículas de alumina. $U = 2,0 \text{ m/s}$	104
Figura 4.41: Umidade adimensional em função do tempo parametrizada na temperatura do ar de secagem para as partículas de sílica-gel. $U = 1,0 \text{ m/s}$	104

- Figura 4.42:** Umidade adimensional em função do tempo experimental e teórica para as partículas de alumina, obtidas através das equações de Mancini e de Henderson e Henderson. $U=1,0$ m/s – $T=100^{\circ}\text{C}$107
- Figura 4.43:** Umidade adimensional em função do tempo experimental e teórica para as partículas de sílica-gel, obtidas através das equações de Mancini e de Brooker *et al.*. $U=1,5$ m/s – $T=100^{\circ}\text{C}$107
- Figura 4.44:** Mapa de temperatura ao longo do leito fluidizado. Valores de temperatura em $^{\circ}\text{C}$. Vista superior do leito.....109
- Figura 4.45:** Umidade adimensional em função do tempo experimental parametrizado no adimensional de vibração para as partículas de alumina. $T_g = 70^{\circ}\text{C}$110
- Figura 4.46:** Umidade adimensional em função do tempo experimental parametrizado no adimensional de vibração para as partículas de sílica-gel. $T_g = 70^{\circ}\text{C}$110
- Figura 4.47:** Temperatura do sólido em função do tempo experimental parametrizado no adimensional de vibração para as partículas de alumina. $T_g = 70^{\circ}\text{C}$111
- Figura 4.48:** Temperatura do sólido em função do tempo experimental Parametrizado no adimensional de vibração para as partículas de sílica-gel. $T_g = 70^{\circ}\text{C}$111
- Figura 4.49:** Umidade adimensional em função do tempo para partículas de alumina. $\Gamma=0,0$ – $T_g=70^{\circ}\text{C}$114
- Figura 4.50:** Umidade adimensional em função do tempo para partículas de alumina. $\Gamma=0,5$ – $T_g=70^{\circ}\text{C}$114

Figura 4.51: Umidade adimensional em função do tempo para partículas de alumina. $\Gamma=1,0 - T_g=70^\circ\text{C}$	115
Figura 4.52: Umidade adimensional em função do tempo para partículas de alumina. $\Gamma=1,5 - T_g=70^\circ\text{C}$	115
Figura 4.53: Umidade adimensional em função do tempo para partículas de sílica-gel. $\Gamma=0,0 - T_g=70^\circ\text{C}$	115
Figura 4.54: Umidade adimensional em função do tempo para partículas de sílica-gel. $\Gamma=0,5 - T_g=70^\circ\text{C}$	115
Figura 4.55: Umidade adimensional em função do tempo para partículas de sílica-gel. $\Gamma=1,0 - T_g=70^\circ\text{C}$	116
Figura 4.56: Umidade adimensional em função do tempo para partículas de sílica-gel. $\Gamma=1,5 - T_g=70^\circ\text{C}$	116
Figura 4.57: Temperatura do sólido em função do tempo para partículas de alumina. $\Gamma=0,0 - T_g=70^\circ\text{C}$	116
Figura 4.58: Temperatura do sólido em função do tempo para partículas de alumina. $\Gamma=0,5 - T_g=70^\circ\text{C}$	116
Figura 4.59: Temperatura do sólido em função do tempo para partículas de alumina. $\Gamma=1,0 - T_g=70^\circ\text{C}$	117
Figura 4.60: Temperatura do sólido em função do tempo para partículas de alumina. $\Gamma=1,5 - T_g=70^\circ\text{C}$	117
Figura 4.61: Temperatura do sólido em função do tempo para partículas de sílica-gel. $\Gamma=0,0 - T_g=70^\circ\text{C}$	117
Figura 4.62: Temperatura do sólido em função do tempo para partículas de sílica-gel. $\Gamma=0,5 - T_g=70^\circ\text{C}$	117

Figura 4.63: Temperatura do sólido em função do tempo para partículas de sílica-gel. $\Gamma=1,0$ - $T_g=70^\circ\text{C}$	118
Figura 4.64: Temperatura do sólido em função do tempo para partículas de sílica-gel. $\Gamma=1,5$ - $T_g=70^\circ\text{C}$	118
Figura C.1: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Henderson. Alumina.....	164
Figura C.2: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Henderson - Thompson. Alumina.....	164
Figura C.3: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Chung-Pfost. Alumina.....	164
Figura C.4: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Chen - Clayton. Alumina.....	164
Figura C.5: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Halsey-modificada. Alumina.....	165
Figura C.6: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Sabbah. Alumina.....	165
Figura C.7: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Henderson. Sílica-gel.....	165
Figura C.8: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Henderson - Thompson. Sílica-gel.....	165
Figura C.9: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Chung-Pfost. Sílica-gel.....	166
Figura C.10: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Chen - Clayton. Sílica-gel.....	166

Figura C.11: Distribuição de freqüência de resíduos determinados para a equação de Halsey-modificada. Sílica-gel.....	166
Figura C.12: Distribuição de freqüência de resíduos determinados para a equação de Sabbah. Sílica-gel.....	166
Figura C.13: Distribuição de resíduos em função dos valores de Y_{eq} preditos pela equação de Henderson. Alumina.....	167
Figura C.14: Distribuição de resíduos em função dos valores de Y_{eq} preditos pela equação de Henderson-Thompson. Alumina.....	167
Figura C.15: Distribuição de resíduos em função dos valores de Y_{eq} preditos pela equação de Chung-Pfost. Alumina.....	167
Figura C.16: Distribuição de resíduos em função dos valores de Y_{eq} preditos pela equação de Chen-Clayton. Alumina.....	167
Figura C.17: Distribuição de resíduos em função dos valores de Y_{eq} preditos pela equação de Halsey modificada. Alumina.....	168
Figura C.18: Distribuição de resíduos em função dos valores de Y_{eq} preditos pela equação de Sabbah. Alumina.....	168
Figura C.19: Distribuição de resíduos em função dos valores de Y_{eq} preditos pela equação de Henderson. Sílica-gel.....	168
Figura C.20: Distribuição de resíduos em função dos valores de Y_{eq} preditos pela equação de Henderson-Thompson. Sílica-gel.....	168
Figura C.21: Distribuição de resíduos em função dos valores de Y_{eq} preditos pela equação de Chung-Pfost. Sílica-gel.....	169
Figura C.22: Distribuição de resíduos em função dos valores de Y_{eq} preditos pela equação de Chen-Clayton. Sílica-gel.....	169

Figura C.23: Distribuição de resíduos em função dos valores de Y_{eq} preditos pela equação de Halsey modificada. Sílica-gel.....	169
Figura C.24: Distribuição de resíduos em função dos valores de Y_{eq} preditos pela equação de Sabbah. Sílica-gel.....	169
Figura E.1: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Lewis. Alumina.....	190
Figura E.2: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Brooker. Alumina.....	190
Figura E.3: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Henderson e Henderson. Alumina.....	190
Figura E.4: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Page. Alumina.....	190
Figura E.5: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Overhults. Alumina.....	191
Figura E.6: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Srzdenicki. Alumina.....	191
Figura E.7: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Mancini. Alumina.....	191
Figura E.8: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Lewis. Sílica-gel.....	192
Figura E.9: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Brooker. Sílica-gel.....	192
Figura E.10: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Henderson e Henderson. Sílica-gel.....	192

Figura E.11: Distribuição de freqüência de resíduos determinados para a equação de Page. Sílica-gel.....	192
Figura E.12: Distribuição de freqüência de resíduos determinados para a equação de Overhults. Sílica-gel.....	193
Figura E.13: Distribuição de freqüência de resíduos determinados para a equação de Srzdenicki. Sílica-gel.....	193
Figura E.14: Distribuição de freqüência de resíduos determinados para a equação de Mancini. Sílica-gel.....	193
Figura E.15: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Lewis. Alumina.....	194
Figura E.16: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Brooker. Alumina.....	194
Figura E.17: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Henderson e Henderson. Alumina.....	194
Figura E.18: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Page. Alumina.....	194
Figura E.19: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Overhults. Alumina.....	195
Figura E.20: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Srzdenicki. Alumina.....	195
Figura E.21: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Mancini. Alumina.....	195
Figura E.22: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Lewis. Sílica-gel.....	196

Figura E.23: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Brooker. Sílica-gel.....	196
Figura E.24: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Henderson e Henderson. Sílica-gel.....	196
Figura E.25: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Page. Sílica-gel.....	196
Figura E.26: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Overhults. Sílica-gel.....	197
Figura E.27: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Srzdenicki. Sílica-gel.....	197
Figura E.28: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Mancini. Sílica-gel.....	197

ÍNDICE DE QUADROS E TABELAS

Quadro 2.1: Equações para determinação da umidade de equilíbrio.....	29
Quadro 2.2: Equações empíricas e semi-empíricas de secagem.....	34
Quadro 3.1: Condições operacionais utilizadas nos ensaios fluidodinâmicos.....	58
Quadro 3.2: Umidade relativa das soluções salinas em função da temperatura.....	61
Quadro 3.3: Condições operacionais utilizadas nos ensaios de cinética de secagem..	63
Tabela 4.1: Umidade de equilíbrio das partículas de alumina e sílica-gel e o respectivo desvio padrão das réplicas.....	92
Tabela 4.2: Resultados obtidos via estimação não linear para as equações de equilíbrio para as partículas de alumina.....	93
Tabela 4.3: Resultados obtidos via estimação não linear para as equações de equilíbrio para as partículas de sílica-gel.....	93
Tabela 4.4: Resultados obtidos via estimação não linear para as equações de secagem para as partículas de alumina.....	105
Tabela 4.5: Resultados obtidos via estimação não linear para as equações de secagem para as partículas de sílica-gel.....	106
Tabela 4.6: Resultados experimentais obtidos para os coeficientes de transferência de calor e massa para as partículas de alumina.....	112
Tabela 4.7: Resultados experimentais obtidos para os coeficientes de transferência de calor e massa para as partículas de sílica-gel.....	112

Tabela A.1: Queda de pressão e desvio padrão para as partículas de alumina em função da velocidade superficial do ar. $d_p = 3,095 \text{ mm} - H = 7,0 \text{ cm}$ A = 1,0 mm.....	137
Tabela A.2: Queda de pressão e desvio padrão para as partículas de alumina em função da velocidade superficial do ar. $d_p = 3,095 \text{ mm} - H = 7,0 \text{ cm}$ A = 2,0 mm.....	138
Tabela A.3: Queda de pressão e desvio padrão para as partículas de alumina em função da velocidade superficial do ar. $d_p = 3,095 \text{ mm} - H = 7,0 \text{ cm}$ A = 3,0 mm.....	139
Tabela A.4: Queda de pressão e desvio padrão para as partículas de alumina em função da velocidade superficial do ar. $d_p = 3,095 \text{ mm} - H = 9,0 \text{ cm}$ A = 1,0 mm.....	140
Tabela A.5: Queda de pressão e desvio padrão para as partículas de alumina em função da velocidade superficial do ar. $d_p = 3,095 \text{ mm} - H = 9,0 \text{ cm}$ A = 2,0 mm.....	141
Tabela A.6: Queda de pressão e desvio padrão para as partículas de alumina em função da velocidade superficial do ar. $d_p = 3,095 \text{ mm} - H = 9,0 \text{ cm}$ A = 3,0 mm.....	142
Tabela A.7: Queda de pressão e desvio padrão para as partículas de alumina em função da velocidade superficial do ar. $d_p = 3,095 \text{ mm} - H = 11,0 \text{ cm}$ A = 1,0 mm.....	143
Tabela A.8: Queda de pressão e desvio padrão para as partículas de alumina em função da velocidade superficial do ar. $d_p = 3,095 \text{ mm} - H = 11,0 \text{ cm}$ A = 2,0 mm.....	144

Tabela A.9: Queda de pressão e desvio padrão para as partículas de alumina em função da velocidade superficial do ar. $d_p = 3,095 \text{ mm} - H = 11,0 \text{ cm}$ $A = 3,0 \text{ mm}$	145
Tabela A.10: Queda de pressão e desvio padrão para as partículas de sílica-gel em função da velocidade superficial do ar. $d_p = 2,595 \text{ mm} - H = 7,0 \text{ cm}$ $A = 1,0 \text{ mm}$	146
Tabela A.11: Queda de pressão e desvio padrão para as partículas de sílica-gel em função da velocidade superficial do ar. $d_p = 2,595 \text{ mm} - H = 7,0 \text{ cm}$ $A = 2,0 \text{ mm}$	147
Tabela A.12: Queda de pressão e desvio padrão para as partículas de sílica-gel em função da velocidade superficial do ar. $d_p = 2,595 \text{ mm} - H = 7,0 \text{ cm}$ $A = 3,0 \text{ mm}$	148
Tabela A.13: Queda de pressão e desvio padrão para as partículas de sílica-gel em função da velocidade superficial do ar. $d_p = 2,595 \text{ mm} - H = 9,0 \text{ cm}$ $A = 1,0 \text{ mm}$	149
Tabela A.14: Queda de pressão e desvio padrão para as partículas de sílica-gel em função da velocidade superficial do ar. $d_p = 2,595 \text{ mm} - H = 9,0 \text{ cm}$ $A = 2,0 \text{ mm}$	150
Tabela A.15: Queda de pressão e desvio padrão para as partículas de sílica-gel em função da velocidade superficial do ar. $d_p = 2,595 \text{ mm} - H = 9,0 \text{ cm}$ $A = 3,0 \text{ mm}$	151
Tabela A.16: Queda de pressão e desvio padrão para as partículas de sílica-gel em função da velocidade superficial do ar. $d_p = 2,595 \text{ mm} - H = 11,0 \text{ cm}$ $A = 1,0 \text{ mm}$	152

Tabela A.17: Queda de pressão e desvio padrão para as partículas de sílica-gel em função da velocidade superficial do ar. $d_p = 2,595 \text{ mm} - H = 11,0 \text{ cm}$ $A = 2,0 \text{ mm}$	153
Tabela A.18: Queda de pressão e desvio padrão para as partículas de sílica-gel em função da velocidade superficial do ar. $d_p = 2,595 \text{ mm} - H = 11,0 \text{ cm}$ $A = 3,0 \text{ mm}$	154
Tabela A.19: Queda de pressão e desvio padrão para as partículas de sílica-gel em função da velocidade superficial do ar. $d_p = 3,095 \text{ mm} - H = 9,0 \text{ cm}$ $A = 2,0 \text{ mm}$	155
Tabela B.1: Dados experimentais no equilíbrio, desvio padrão e média para as partículas de alumina. $T = 30^\circ\text{C}$	157
Tabela B.2: Dados experimentais no equilíbrio, desvio padrão e média para as partículas de alumina. $T = 45^\circ\text{C}$	158
Tabela B.3: Dados experimentais no equilíbrio, desvio padrão e média para as partículas de alumina. $T = 60^\circ\text{C}$	159
Tabela B.4: Dados experimentais no equilíbrio, desvio padrão e média para as partículas de sílica-gel. $T = 30^\circ\text{C}$	160
Tabela B.5: Dados experimentais no equilíbrio, desvio padrão e média para as partículas de sílica-gel. $T = 45^\circ\text{C}$	161
Tabela B.6: Dados experimentais no equilíbrio, desvio padrão e média para as partículas de sílica-gel. $T = 60^\circ\text{C}$	162
Tabela D.1: Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de alumina e respectivas réplicas. $d_p = 3,095 \text{ mm}$. $T_g = 100^\circ\text{C}$ $U = 0,5 \text{ e } 1,0 \text{ m/s}$, $Y_0 = 1,00 \text{ (b.s)}$ - $V = 21,65 \text{ cm}^3$	171

- Tabela D.2:** Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de alumina e respectivas réplicas. $d_p = 3,095$ mm. $T_g = 100^\circ\text{C}$
 $U = 1,5$ e $2,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.....172
- Tabela D.3:** Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de alumina e respectivas réplicas. $d_p = 3,095$ mm. $T_g = 100^\circ\text{C}$
 $U = 2,5$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.173
- Tabela D.4:** Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de alumina e respectivas réplicas. $d_p = 3,095$ mm. $T_g = 80^\circ\text{C}$
 $U = 0,5$ e $1,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.....174
- Tabela D.5:** Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de alumina e respectivas réplicas. $d_p = 3,095$ mm. $T_g = 80^\circ\text{C}$
 $U = 1,5$ e $2,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.....175
- Tabela D.6:** Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de alumina e respectivas réplicas. $d_p = 3,095$ mm. $T_g = 80^\circ\text{C}$
 $U = 2,5$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.....176
- Tabela D.7:** Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de alumina e respectivas réplicas. $d_p = 3,095$ mm. $T_g = 60^\circ\text{C}$
 $U = 0,5$ e $1,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.....177
- Tabela D.8:** Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de alumina e respectivas réplicas. $d_p = 3,095$ mm. $T_g = 60^\circ\text{C}$
 $U = 1,5$ e $2,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.....178
- Tabela D.9:** Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de alumina e respectivas réplicas. $d_p = 3,095$ mm. $T_g = 60^\circ\text{C}$
 $U = 2,5$ m/, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.....179

- Tabela D.10:** Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de sílica-gel e respectivas réplicas. $d_p = 2,595$ mm. $T_g = 100^\circ\text{C}$
 $U = 0,5$ e $1,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³180
- Tabela D.11:** Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de sílica-gel e respectivas réplicas. $d_p = 2,595$ mm. $T_g = 100^\circ\text{C}$
 $U = 1,5$ e $2,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³181
- Tabela D.12:** Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de sílica-gel e respectivas réplicas. $d_p = 2,595$ mm. $T_g = 100^\circ\text{C}$
 $U = 2,5$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³182
- Tabela D.13:** Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de sílica-gel e respectivas réplicas. $d_p = 2,595$ mm. $T_g = 80^\circ\text{C}$
 $U = 0,5$ e $1,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³183
- Tabela D.14:** Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de sílica-gel e respectivas réplicas. $d_p = 2,595$ mm. $T_g = 80^\circ\text{C}$
 $U = 1,5$ e $2,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³184
- Tabela D.15:** Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de sílica-gel e respectivas réplicas. $d_p = 2,595$ mm. $T_g = 80^\circ\text{C}$
 $U = 2,5$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³185
- Tabela D.16:** Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de sílica-gel e respectivas réplicas. $d_p = 2,595$ mm. $T_g = 60^\circ\text{C}$
 $U = 0,5$ e $1,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³186
- Tabela D.17:** Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de sílica-gel e respectivas réplicas. $d_p = 2,595$ mm. $T_g = 60^\circ\text{C}$
 $U = 1,5$ e $2,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³187

Tabela D.18: Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de sílica-gel e respectivas réplicas. $d_p = 2,595$ mm. $T_g = 60^\circ\text{C}$ $U = 2,5$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm ³	188
Tabela F.1: Dados experimentais de tempo, umidade e temperatura dos sólidos e temperatura do ar para as partículas de alumina. $\Gamma = 0,0 - T_{gb} = 70^\circ\text{C}$ $Y_{eq} = 0,003$ (b.s).....	199
Tabela F.2: Dados experimentais de tempo, umidade e temperatura dos sólidos e temperatura do ar para as partículas de alumina. $\Gamma = 0,5 - T_{gb} = 70^\circ\text{C}$ $Y_{eq} = 0,003$ (b.s).....	199
Tabela F.3: Dados experimentais de tempo, umidade e temperatura dos sólidos e temperatura do ar para as partículas de alumina. $\Gamma = 1,0 - T_{gb} = 70^\circ\text{C}$ $Y_{eq} = 0,003$ (b.s).....	200
Tabela F.4: Dados experimentais de tempo, umidade e temperatura dos sólidos e temperatura do ar para as partículas de alumina. $\Gamma = 1,5 - T_{gb} = 70^\circ\text{C}$ $Y_{eq} = 0,003$ (b.s).....	200
Tabela F.5: Dados experimentais de tempo, umidade e temperatura dos sólidos e temperatura do ar para as partículas de sílica-gel. $\Gamma = 0,0 - T_{gb} = 70^\circ\text{C}$ $Y_{eq} = 0,014$ (b.s).....	201
Tabela F.6: Dados experimentais de tempo, umidade e temperatura dos sólidos e temperatura do ar para as partículas de sílica-gel. $\Gamma = 0,5 - T_{gb} = 70^\circ\text{C}$ $Y_{eq} = 0,014$ (b.s).....	201
Tabela F.7: Dados experimentais de tempo, umidade e temperatura dos sólidos e temperatura do ar para as partículas de sílica-gel. $\Gamma = 1,0 - T_{gb} = 70^\circ\text{C}$ $Y_{eq} = 0,014$ (b.s).....	202

Tabela F.8: Dados experimentais de tempo, umidade e temperatura dos sólidos e temperatura do ar para as partículas de sílica-gel. $\Gamma = 1,5 - T_{gb} = 70^{\circ}\text{C}$

$Y_{eq} = 0,014$ (b.s).....202

NOMENCLATURA

a	Área interfacial das partículas	$[L^{-1}]$
A	Amplitude vibracional	$[L]$
A_L	Área do leito	$[L^2]$
c_p	Calor específico	$[L^2T^{-2}\theta^{-1}]$
d_m	Diâmetro mínimo da partícula	$[L]$
d_M	Diâmetro máximo da partícula	$[L]$
d_p	Diâmetro da partícula	$[L]$
D	Diâmetro do leito	$[L]$
f	Frequência vibracional	$[T^{-1}]$
g	Aceleração da gravidade	$[LT^{-2}]$
h_p	Coefficiente de transferência de calor	$[MT^{-3}\theta^{-1}]$
H	Altura do leito de partículas	$[L]$
k_p	Coefficiente de transferência de massa	$[LT^{-1}]$
K	Constante de secagem, dimensão depende da equação	$[---]$
K_p	Coefficiente de transferência de massa	$[ML^{-2}T^{-1}]$
L	Comprimento do leito	$[L]$
m_g	Vazão mássica de ar	$[MT^{-1}]$
m_v	Taxa de transferência de massa de vapor	$[MT^{-1}]$
M_s	Massa do leito de partículas	$[M]$
P	Pressão parcial	$[ML^{-1}T^{-2}]$

P_T	Pressão total do sistema	$[ML^{-1}T^{-2}]$
PM	Peso molecular	$[M]$
q	Fluxo de calor	$[ML^2T^{-3}]$
Q	Vazão volumétrica de ar	$[L^3T^{-1}]$
R	Constante universal dos gases	$[L^2T^{-2}\theta^{-1}]$
t	Tempo	$[T]$
T	Temperatura	$[\theta]$
T_{gs}	Temperatura do gás na saturação	$[\theta]$
U	Velocidade do ar	$[LT^{-1}]$
UR	Umidade relativa	$[---]$
V	Volume do leito de partículas	$[L^3]$
w	Fração mássica	$[---]$
y	Fração molar	$[---]$
Y	Umidade absoluta do ar (b.s)	$[---]$
Y_{eq}	Umidade absoluta do sólido em equilíbrio com o ar (b.s)	$[---]$
Y_s	Umidade absoluta do sólido (b.s)	$[---]$
Y_{vs}	Umidade absoluta do gás na saturação	$[---]$
z	Distância linear no leito	$[L]$

SÍMBOLOS GREGOS

ΔC_m	Concentração de vapor na fase gasosa	$[ML^3]$
Δh	Altura manométrica	$[L]$
ΔP	Queda de pressão	$[ML^{-1}T^{-2}]$

ΔT_m	Diferença média de temperatura	[θ]
ΔS	Desvio padrão	[$ML^{-1}T^{-2}$]
ε	Porosidade	[---]
ϕ	Esfericidade	[---]
φ	Grau de saturação de glicerol	[---]
Γ	Adimensional de vibração	[---]
λ	Calor latente de vaporização	[L^2T^{-2}]
μ	Viscosidade	[$ML^{-1}T^{-1}$]
ν	Viscosidade cinemática	[L^2T^{-1}]
ρ	Densidade	[ML^{-3}]
ω	Frequência angular	[T^{-1}]

PARÂMETROS DE EQUAÇÕES

a, b, c, d	Parâmetros relativos às equações de equilíbrio, dimensional ou adimensional de acordo com as equações
A, B, C, D,	Parâmetros relativos às equações semi-empíricas de secagem,
a_1, a_2, b_1, b_2	dimensional ou adimensional de acordo com as equações
n, K_1, K_2, E_1 e E_2	
C_1, C_2, C_3, C_4	Constantes relativas à equação da pressão parcial de saturação da
C_5 e C_6	água

SUBSCRITOS

1	entrada
2	saída
a	alimentação
b	base do leito
e	equivalente
g	gás
l	líquido
s	sólido
sp	sistema particulado
p	partícula
mm	mínima mistura
mf	mínima fluidização
mvf	mínima vibro-fluidização
o	valor inicial
v	vapor
w	água
ws	saturação

ABREVIACÕES

b.s	base seca
mist	mistura

ADIMENSIONAIS

Número de Arquimedes $Ar = \frac{\rho_p(\rho_p - \rho)g.d_p^3}{\mu^2}$

Número de Reynolds da partícula na U_{mf} $Re_{mf} = \sqrt{33,7^2 + 0,0408.Ar} - 33,7$

Número de Reynolds vibratório $Re_v = \frac{\rho_g d_e^2 \omega}{\mu_g}$

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A secagem é uma das operações unitárias mais antigas e vem sendo utilizada amplamente em diversos processos dentro da indústria química e envolve a transferência simultânea de calor e massa.

O processo de secagem deve ser realizado em equipamentos que favorecem a interação fluido-partícula. As características comuns a este contato estão relacionados com o tipo de equipamento no qual o processo será realizado. Assim, pode-se destacar os equipamentos que favorecem uma maior interação fluido-partícula: os leitos fluidizados, os leitos vibro-fluidizados, os leitos fluidizados circulantes, os leitos de jorro e os leitos vibro-jorradados. Dentro deste contexto, os leitos vibro-fluidizados, que são caracterizados pela imposição de vibrações aos leitos fluidizados, têm sido objetos de estudo de vários pesquisadores: Strumillo e Pakowski (1980), Gupta e Mujumdar (1980a), Yamazaki *et al.* (1974), Garim e Freire (1994), Camargo e Freire (2001), Daleffe *et al.* (2001) entre outros, pois os mesmos possibilitam a redução no tempo de secagem, permitem uma maior economia térmica, reduzem as quantidades de ar necessárias para a fluidização, propiciam uma secagem mais uniforme e eficiente de materiais aglomerantes, evitam a formação de bolhas e canais preferenciais.

Embora exista na literatura vários estudos a respeito dos fenômenos de transferência de calor e massa em leitos fluidizados, ainda é escasso o estudo envolvendo os fenômenos de transferência para os leitos vibro-fluidizados.

Um estudo mais criterioso a respeito dos leitos vibro-fluidizados e a análise das diversas variáveis que podem influenciar o comportamento fluidodinâmico do leito, juntamente com o estudo dos complexos fenômenos de transferência de calor e massa que envolvem o processo de secagem merecem especial destaque, principalmente a determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa. Dentro desta realidade, um dos objetivos principais deste trabalho é a determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa e a análise de quanto os mesmos podem ser influenciados pelas diversas variáveis do processo, em especial, a energia vibracional imposta ao leito.

A relevância desses fatos foi o incentivo para a realização deste trabalho que tem por objetivos:

- estudar a fluidodinâmica dos leitos fluidizados e vibro-fluidizados, utilizando como partículas alumina e sílica-gel, de diferentes diâmetros, através das curvas características e de desvio-padrão de ambos os sistemas e avaliando a influência dos parâmetros; altura do leito de partículas, amplitude e frequência de vibração e o diâmetro das partículas;
- obter experimentalmente as isotermas de equilíbrio para as partículas de alumina e sílica-gel e análise dos principais modelos de isoterma propostos na literatura;
- determinar a cinética de secagem em camada fina para os leitos fluidizados e vibro-fluidizados e o respectivo ajuste aos modelos de cinética existentes na literatura;
- determinar experimentalmente os coeficientes de transferência de calor e massa segundo a metodologia proposta por Kmiec (1975);

- determinar os perfis de umidade e temperatura do sólido, a partir do modelo a duas fases proposto por Massarani e Silva Telles (1992) para leitos fluidizados, utilizando os coeficientes de transferência de calor e massa determinados experimentalmente;
- estudar a influência da energia vibracional, nos coeficientes de transferência de calor e massa em leito vibro-fluidizado e
- validar experimentalmente os perfis de umidade e temperatura do sólido obtidos via simulação.

De forma a possibilitar o desenvolvimento deste trabalho foram propostas etapas que foram constituídas por: uma revisão bibliográfica; implementação e ajustes de equipamentos, juntamente com a instrumentação necessária para a realização dos experimentos; análise dos resultados obtidos e sua análise comparativa aos resultados presentes na literatura.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão a ser apresentada faz uma abordagem das diversas linhas de pesquisas realizadas em leitos fluidizados e em leitos vibro-fluidizados, onde se faz uma análise da fluidodinâmica e dos fundamentos do processo de secagem, onde destacam-se: a determinação das isotermas de equilíbrio, da cinética de secagem e o estudo dos complexos mecanismos de transferência de calor e massa.

2.1) O estudo dos leitos vibro-fluidizados

Uma primeira abordagem no tratamento dos leitos vibro-fluidizados é a sua própria caracterização. Os leitos vibro-fluidizados diferem-se dos fluidizados em decorrência da energia vibracional (vertical ou horizontal) imposta ao sistema partícula-fluido.

Os estudos dos leitos vibro-fluidizados encontram-se fundamentados especialmente nas pesquisas desenvolvidas por Gupta e Mujumdar (1980a), Erdéz e Ormós (1984), Strumillo e Pakowski (1980), e Yamazaki *et al.* (1974), que estudou a transferência de calor em leitos vibro-fluidizados.

Erdéz e Ormós (1984) estudaram a queda de pressão em função da velocidade do ar nos leitos vibro-fluidizados quando submetidos a diferentes condições operacionais.

Segundo Gupta e Mujumdar (1980a), Erdéz *et al.* (1986), Della Tonia Jr *et al.* (1989), Erdéz (1990) as principais vantagens na utilização dos leitos vibro-fluidizados em relação aos demais leitos são:

- a vibração mecânica reduz a quantidade de ar necessária para a fluidização e como consequência disto há uma redução do arraste de partículas;
- melhor controle da distribuição do tempo de residência pela manipulação da amplitude e da frequência vibracional;
- coeficientes de transferência de calor e massa mais elevados;
- redução considerável da queda de pressão e da velocidade de mínima fluidização pela agitação mecânica;
- a vibração elimina zonas mortas e formação de bolhas, resultando em operações mais uniformes;
- possibilidade de fluidizar materiais adesivos, e pastosos;
- vários processos como a secagem, granulação, resfriamento e recobrimento podem ser realizados no mesmo equipamento, e
- o movimento de material através do secador é mais suave o que possibilita o tratamento de materiais frágeis.

A intensidade da energia vibracional fornecida para estes sistemas é representada pelo adimensional de vibração denominado de Γ . Este parâmetro relaciona a amplitude e a frequência vibracional com a aceleração gravitacional, da seguinte forma:

$$\Gamma = \frac{A.(2.\pi.f)^2}{g} \quad (2.1)$$

onde: A é a amplitude de vibração; f é a frequência vibracional e g é a aceleração da gravidade.

O adimensional de vibração, conforme Erdész (1991), pode ser interpretado fisicamente como sendo a relação entre a aceleração média vibracional exercida sobre o sistema e a aceleração gravitacional. Pode ser ainda definida como a razão entre a força de inércia e a força peso da partícula, se ambos os termos da equação (2.1) forem multiplicados pela massa da partícula.

O detalhamento dos leitos vibro-fluidizados será feito nos sub-itens a seguir, onde serão abordados, entre outros temas, os diferentes regimes de operação e a sua caracterização fluidodinâmica .

2.1.1) Regimes de operação nos leitos vibro-fluidizados

O comportamento dos leitos submetidos a vibração apresentam vários regimes de operação e foram baseados em observações visuais realizadas por Bratu e Jinescu (1971), nos quais os regimes de operação são funções da grandeza do adimensional de vibração. De acordo com a intensidade do adimensional de vibração, os regimes de operação foram divididos em três classes:

- estado vibrado: $\Gamma < 1$, o leito se comporta como um leito fluidizado, sendo que a vibração somente auxilia na estabilidade e homogeneização do leito;
- vibro-fluidizado: $\Gamma \cong 1$, tanto a energia vibracional quanto o escoamento de ar contribuem para a fluidização e o comportamento do leito é influenciado pela grandeza relativa de ambos os fatores, e

- fluidizado vibrado: $\Gamma > 1$, o leito sofre somente a ação das forças vibracionais, e sob estas circunstâncias, o ar é somente um meio para a transferência de calor e massa.

Posteriormente Strumillo e Pakowski (1980) apresentaram uma classificação mais abrangente na qual é levada em consideração a grandeza do adimensional de vibração e a velocidade de mínima vibro-fluidização (U_{mvf}). Em conformidade com essa proposta os regimes de operação foram definidos como:

- leito vibrado: para $\Gamma > 1$ e ausência de escoamento de ar;
- leito compacto: $\Gamma < 1$ e ausência de escoamento de ar;
- leito vibro-fluidizado: $\Gamma > 1$ e velocidade do ar, $U < U_{mvf}$, e
- leito fluidizado vibrado, válido para qualquer Γ e velocidade do ar, $U > U_{mvf}$.

2.1.2) A fluidodinâmica dos leitos fluidizados e vibro-fluidizados

Segundo Garim (1998), para o estudo de um determinado tipo de leito, seja ele fixo, fluidizado, jorrado, pneumático, vibrado ou vibro-fluidizado aerado é necessário ter-se preliminarmente a sua curva característica (perda de carga em função da velocidade do fluido). Esta curva trata do comportamento da variação da queda de pressão no leito em relação à velocidade ou vazão com que o fluido percola o leito.

As curvas características para leitos sujeitos a vibração, foram apresentadas por Strumillo e Pakowski (1980), onde pôde ser observado que a sua forma é bastante influenciada pela ação das forças vibracionais. Os tipos mais comuns de curvas características para a fluidização são apresentadas na figura 2.1.

A curva característica típica de um leito fluidizado é apresentada pela curva (a) da figura 2.1. Esta curva pode ser amortecida pela vibração e nenhum pico de pressão máximo é observado como pode ser visto na curva (b). Para baixas acelerações vibracionais a curva (a) também foi observada. Bratu e Jinescu (1971) observaram que, sob certas condições de vibração, a curva (c) é obtida, e que a velocidade de mínima vibro-fluidização, é uma função da amplitude e da frequência de vibração. Quando a frequência aumenta, mantendo-se constante a amplitude, a velocidade tende para a velocidade de mínima fluidização em condições de não vibração U_{mf} , e a curva torna-se semelhante a curva (b). Strumillo e Pakowski (1980), relataram que, para a maioria dos casos foram observados as curvas (a) e (d). Em especial, no caso da curva (d), afirmaram que no primeiro ponto de inflexão inicia-se o movimento das partículas (vibro-fluidização incipiente) e no segundo ponto desenvolve-se a fluidização (leito vibro-fluidizado).

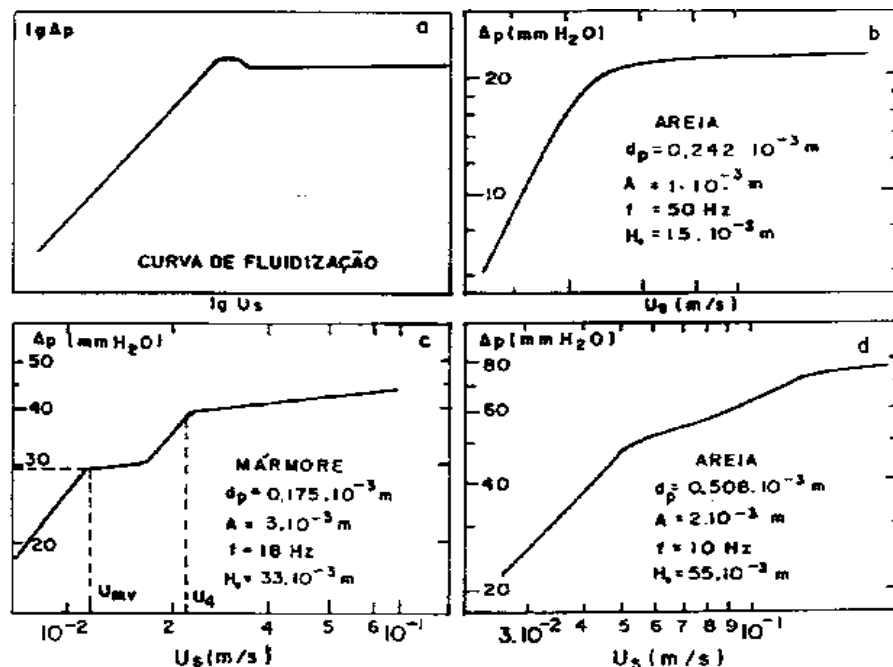


Figura 2.1: Exemplos de curvas características para os leitos fluidizados (a) e para os leitos vibro-fluidizados (b, c, d). – (Strumillo e Pakowski, 1980).

De acordo com Strumillo e Pakowski (1980), a explicação mais plausível é que a curva característica de fluidização é dependente da razão entre as forças de vibração e as forças aerodinâmicas, agindo no leito. Para baixas acelerações vibracionais, $A \cdot \square^2 < g$, a curva (a) é a mais comum de ser obtida, enquanto que, para altas acelerações vibracionais, $A \cdot \square^2 > 9,0$, a curva (b) é a mais observada. Para moderados valores de acelerações vibracionais, as curvas (c) e (d) podem ser observadas.

Conforme Garim (1998), a partir da curva característica de um leito vibro-fluidizado pode-se obter informações de queda de pressão máxima e velocidade de mínima fluidização. Estas variáveis podem ser parametrizadas através das variáveis: amplitude, frequência, altura do leito, diâmetro das partículas, entre outras.

Camargo (1998) estudou a fluidodinâmica dos leitos fluidizados e vibro-fluidizados, compostos por partículas esféricas de vidro analisando a influência da altura do leito e do diâmetro das partículas, figura 2.2. Os resultados obtidos indicaram uma boa semelhança às curvas apresentadas por Strumillo e Pakowski (1980), sendo que as curvas características obtidas apresentaram comportamento similar para as três alturas estudadas.

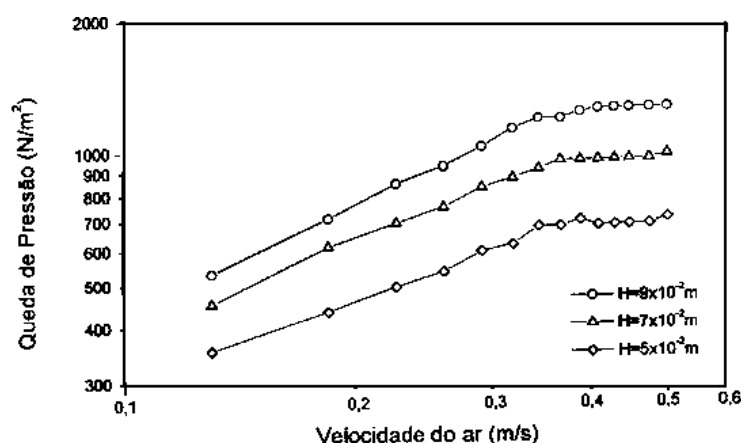


Figura 2.2: Curvas características de fluidização em função da altura do leito para partículas de vidro – $d_p = 700\mu\text{m}$, $f = 10\text{Hz}$, $A = 1,98 \times 10^{-2}\text{m}$, (Camargo, 1998).

Camargo (1998) observou ainda que para uma mesma altura de leito, a queda de pressão diminui na região fluidizada quando comparada com a queda de pressão para o sistema sem vibração, figura 2.3. Este comportamento comprova os resultados obtidos por Gupta e Mujumdar (1980b), Erdész *et al.* (1986), Della Tonia Jr *et al.* (1989), Erdész (1990) e outros, na qual a diminuição da queda de pressão para uma altura constante do leito é uma das justificativas para se impor aos leitos fluidizados uma energia adicional, favorecendo a percolação do fluido através do leito.

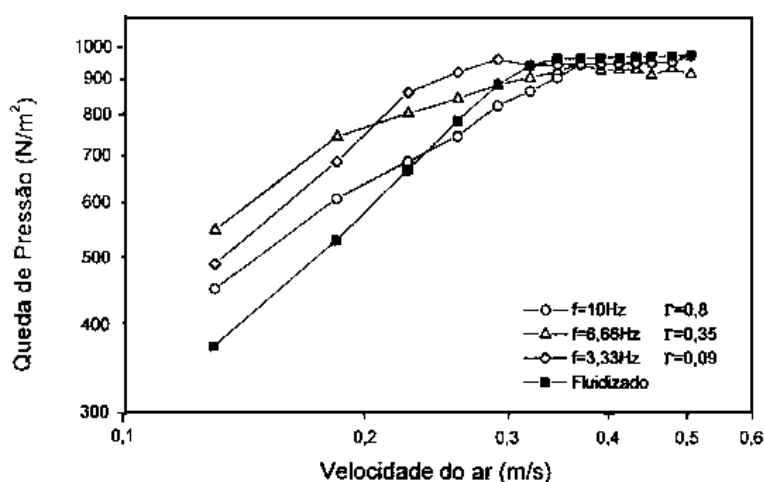


Figura 2.3: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado na frequência e no adimensional de vibração para partículas de vidro, $d_p = 700\mu\text{m}$, $H = 7,0 \times 10^{-2} \text{ m}$ e $A = 1,98 \times 10^{-3} \text{ m}$. (Camargo, 1998).

Daleffe (2002) estudou a reprodutividade das curvas características para os leitos fluidizados e vibro-fluidizados, utilizando partículas esféricas de vidro do tipo “ballotini” e os resultados obtidos também concordam com os resultados apresentados por Strumillo e Pakowski (1980), como mostrado nas figuras 2.4 e 2.5.

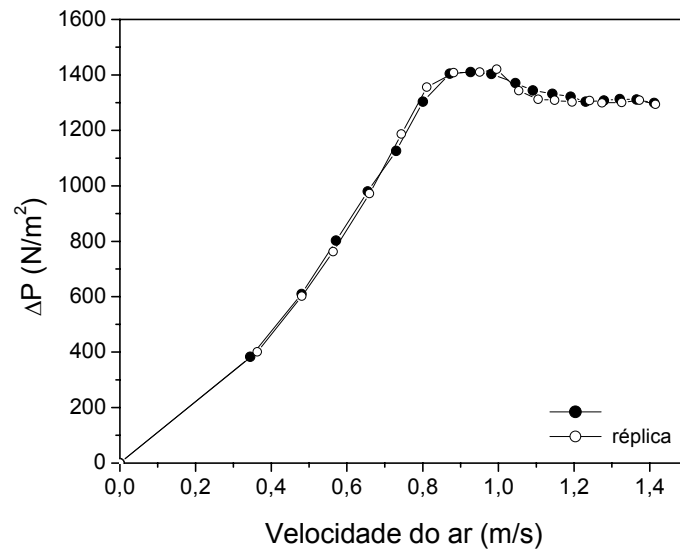


Figura 2.4: - Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado e sua respectiva réplica – esferas de vidro $d_p = 1,545 \times 10^{-3} \text{ m}$, (Daleffe, 2002).

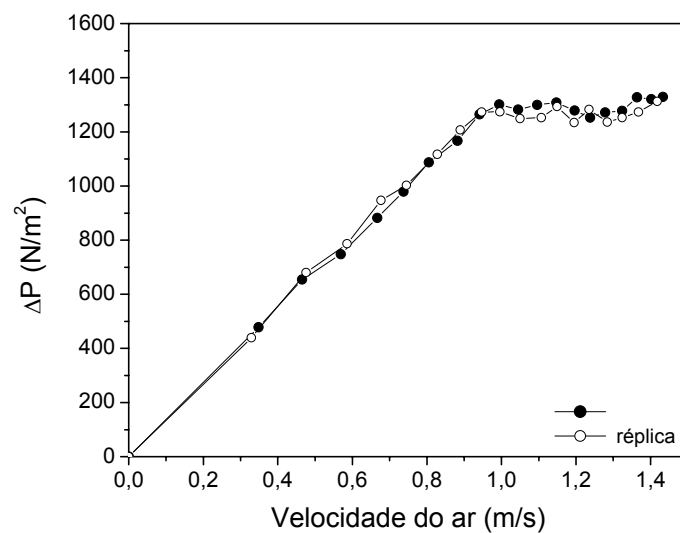


Figura 2.5: - Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado e sua respectiva réplica – esferas de vidro - $d_p = 1,545 \times 10^{-3} \text{ m}$, $\Gamma = 1,0$ e $A = 3,0 \times 10^{-3} \text{ m}$, (Daleffe, 2002).

Daleffe (2002) estudou também o comportamento fluidodinâmico do leito quando submetido ao efeito de saturação de líquido (glicerol), onde observou-se que não era possível fluidizar as partículas sem a ação da vibração para o leito saturado com o líquido. Este comportamento pode ser observado na figura 2.6, onde não se verifica nenhum patamar na curva característica, peculiar da transição de leito fixo para o leito fluidizado. Quando o sistema foi submetido a vibração, o leito apresentou a formação de alguns patamares, mostrando que houve a passagem do estado de leito fixo para o leito fluidizado, conforme mostra a figura 2.7, resultados estes também obtidos por Malhotra *et al.* (1984).

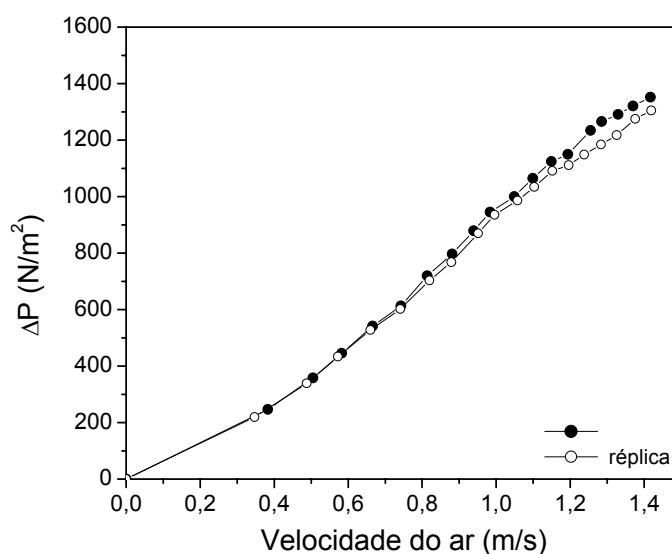


Figura 2.6: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado e sua respectiva réplica na presença de glicerol – esferas de vidro $d_p = 1,545 \times 10^{-3} m$, $\phi = 0,0010$, (Daleffe, 2002).

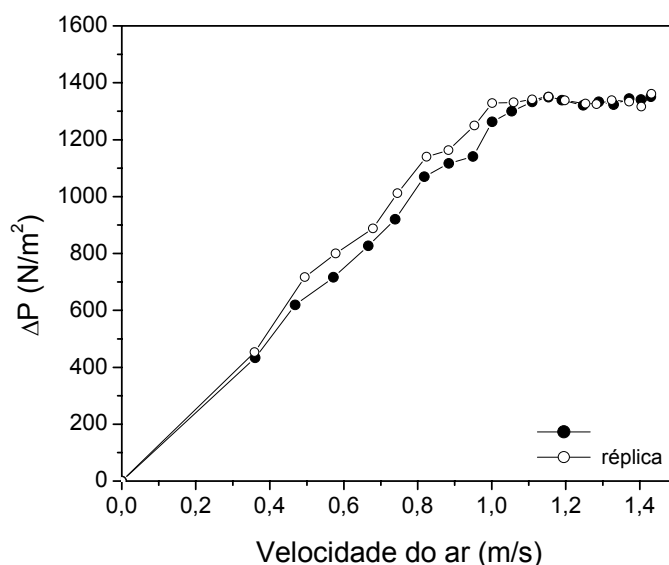


Figura 2.7: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado e sua respectiva réplica na presença de glicerol – esferas de vidro $d_p = 1,545 \times 10^{-3} \text{ m}$, $\Gamma = 1,0$; $\varphi = 0,0010$, (Daleffe, 2002).

Erdész e Ormós (1984) estudaram a influência do aumento da amplitude de vibração, utilizando como partículas inertes areia, previamente secas, de diversos diâmetros. A amplitude de vibração variou entre 0,6 a 1,85 mm. A figura 2.8 apresenta os resultados obtidos e mostram que com o aumento da amplitude de vibração há uma redução da queda de pressão através do leito em função do aumento da energia vibracional imposta ao mesmo, neste caso o adimensional de vibração, Γ , variou de 2,50 a 7,39. Eles observaram também que para maiores valores da velocidade superficial do ar e maior amplitude de vibração há uma redução da queda de pressão na região de fluidização bem desenvolvida.

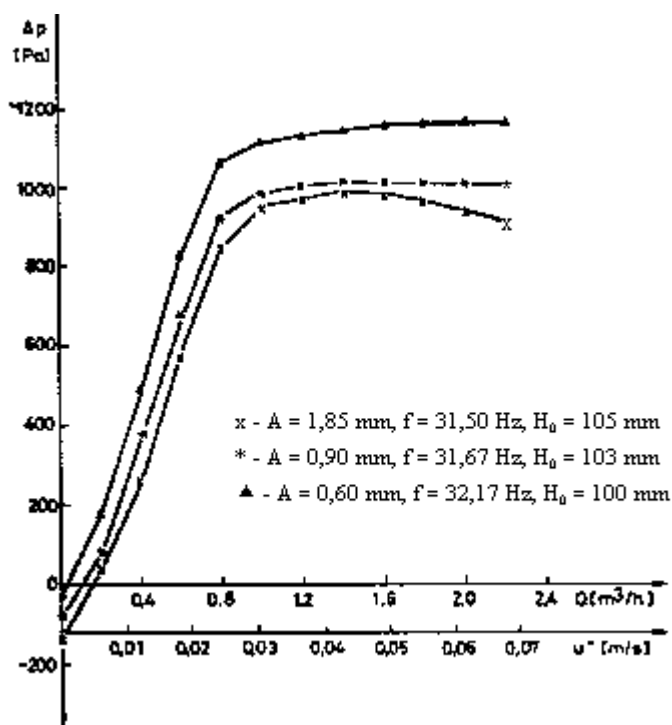


Figura 2.8: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizado na amplitude de vibração. (Erdész e Ormós, 1984).

Daleffe (2002) avaliou a influência do diâmetro das partículas de inertes no comportamento fluidodinâmico dos leitos fluidizados e vibro-fluidizados na ausência e na presença de glicerol. Para o leito fluidizado na ausência de glicerol observou-se que o diâmetro das partículas exerce uma influência significativa nas curvas de queda pressão em função da velocidade superficial do ar na região de leito fixo e uma menor influência na região de fluidização bem desenvolvida. A figura 2.9 apresenta os resultados obtidos para o leito fluidizado na ausência de glicerol. Na presença de glicerol, as partículas de menores diâmetros apresentaram uma fluidização bem definida, já para as partículas de maiores diâmetros a associação das forças viscosas e da força peso impediu que a fluidização ocorresse.

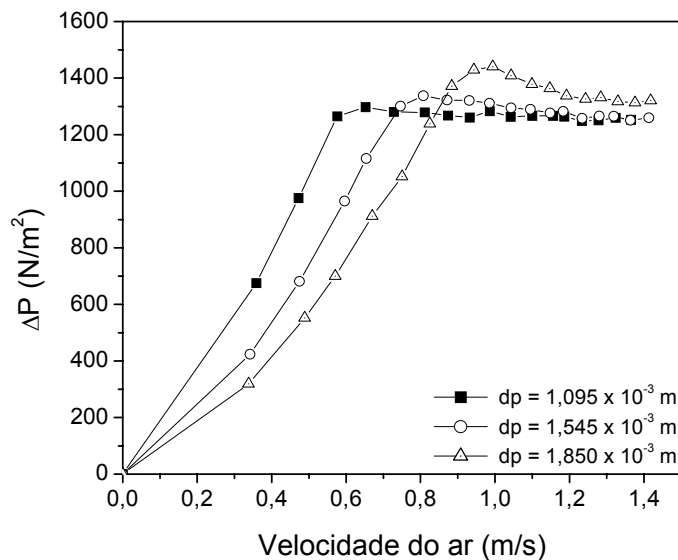


Figura 2.9: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar parametrizada no diâmetro das partículas. (Daleffe, 2002).

2.1.3) Velocidade de vibro-fluidização incipiente

Para um leito fluidizado convencional, a transição do regime de leito fixo para leito fluidizado é facilmente perceptível e a intersecção de duas retas na curva de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, $\Delta P \times U$, fornece uma boa estimativa da velocidade de mínima fluidização (U_{mf}), conforme está esquematizado na figura 2.10. Este comportamento é típico para os leitos fluidizados na determinação da velocidade de mínima fluidização.

Já para os leitos vibro-fluidizados este procedimento não é apropriado, fato que motivou pesquisadores a introduzirem um novo conceito para a determinação da velocidade de mínima fluidização.

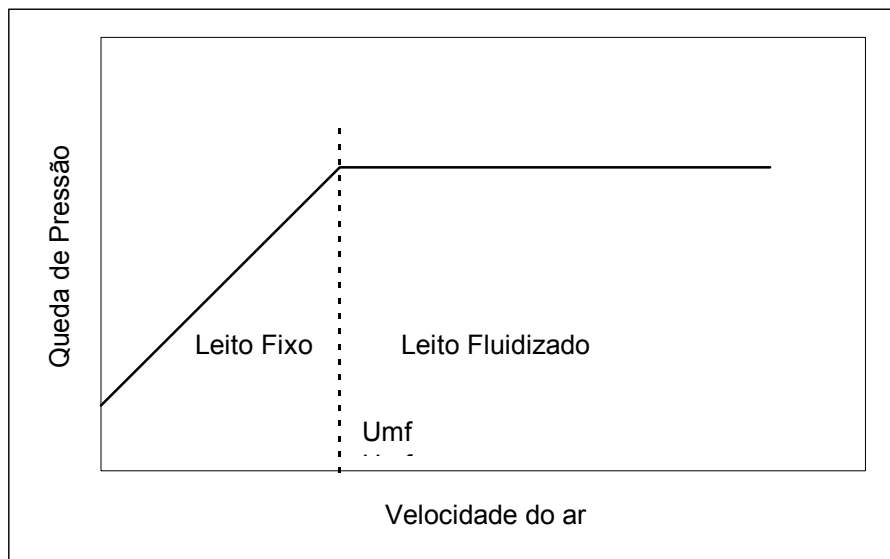


Figura 2.10: Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para um leito fluidizado – Estimativa da velocidade de mínima fluidização.

Para os leitos vibro-fluidizados a transição de regime ocorre sobre uma considerável faixa de velocidade do ar, sendo portanto, não apropriada para definir a velocidade de mínima fluidização. O efeito desta transição, pode provocar diferenças na determinação da velocidade de mínima fluidização. Estas observações foram efetuadas por Gupta e Mujumdar (1980a), os quais observaram um aumento da velocidade de mínima fluidização como definida para os leitos fluidizados convencionais, com o aumento da frequência angular, para a mesma amplitude. Os resultados obtidos utilizando partículas inertes de polietileno estão apresentados na figura 2.11, sendo que a velocidade de mínima vibro-fluidização (U_{mvf}) está adimensionalizada em relação a U_{mf} . Em função destes resultados contrariarem a razões físicas, Gupta e Mujumdar (1980a), introduziram o conceito de velocidade mínima de agitação - U_{mm} . Esta é a velocidade na qual os sólidos iniciam seus movimentos uns em relação aos outros, podendo ser determinada através de

observações visuais, durante a determinação da curva característica dos leitos vibrados. Este critério, de acordo com Gupta e Mujumdar (1980a), parece ser o mais adequado para ser usado nos leitos vibro-fluidizados, em relação ao critério definido para os leitos fluidizados convencionais.

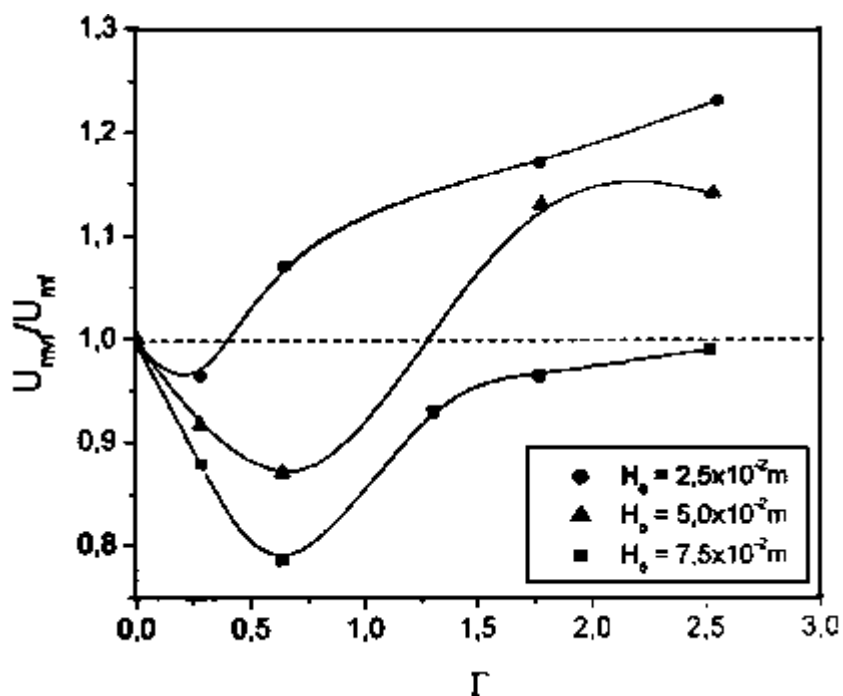


Figura 2.11: U_{mvf}/U_{mf} em função do adimensional de vibração parametrizado na altura do leito de partículas, (Gupta e Mujumdar, 1980a).

Gupta e Mujumdar (1980a), observaram também o comportamento da velocidade de mínima agitação em função do parâmetro adimensional de vibração, \square . A figura 2.12, descreve como a velocidade mínima de agitação decresce com a aceleração vibracional. Assim, para $\square > 1$, não é necessário qualquer vazão de ar para manter os sólidos em movimento, um estado definido como estado de *pseudo-fluidização*.

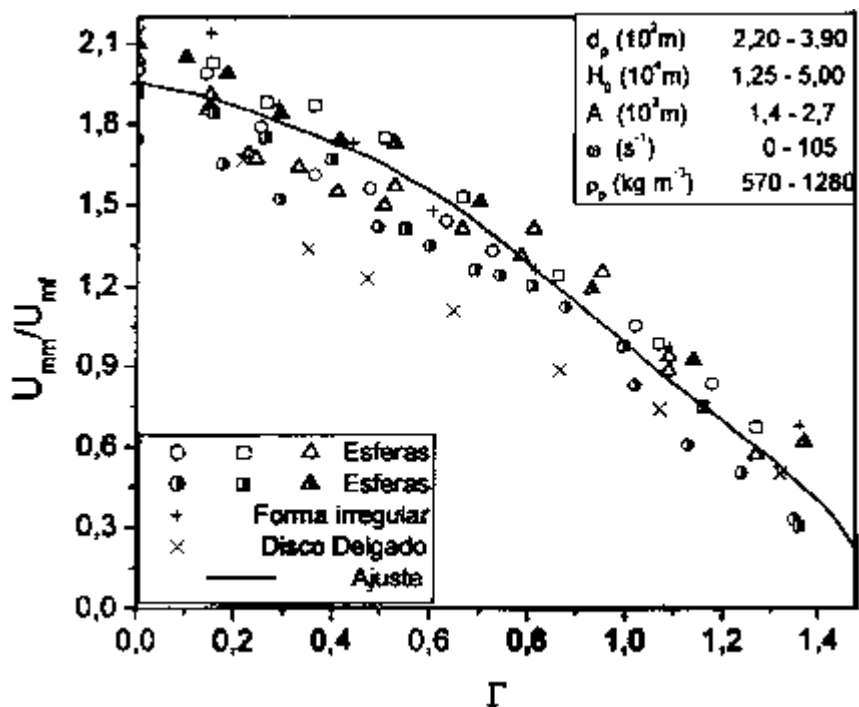


Figura 2.12: U_{mm}/U_{mf} em função do adimensional de vibração parametrizado no tipo de partículas, (Gupta e Mujumdar, 1980a).

Os resultados da U_{mm} na figura 2.12, foram ajustados por intermédio da seguinte correlação empírica:

$$\frac{U_{mm}}{U_{mf}} = 1,952 - 0,275 \cdot \Gamma - 0,686 \Gamma^2 \tag{2.2}$$

A velocidade de mínima fluidização U_{mf} da equação (2.2) para o leito fluidizado foi estimada pela correlação de Wen e Yu (1966) e é dada por:

$$U_{mf} = \frac{Re_{mf} \cdot \mu}{\rho \cdot d_p} \quad , \text{ para } Re_{mf} < 20 \tag{2.3}$$

onde: $Re_{mf} = \sqrt{33,7^2 + 0,0408 \cdot Ar} - 33,7$, e (2.4)

$$Ar = \frac{\rho \cdot (\rho_p - \rho) \cdot g \cdot d_p^3}{\mu^2} \quad (2.5)$$

onde: Ar é o Número de Arquimedes, Re_{mf} o Número de Reynolds da partícula na U_{mf} , ρ a densidade do ar, ρ_p a densidade da partícula, μ a viscosidade do ar e d_p o diâmetro da partícula.

Garim e Freire (1994) obtiveram a velocidade de mínima vibro-fluidização, U_{mvf} , utilizando o critério da velocidade de mínima fluidização em virtude da dificuldade de observação do momento em que realmente as partículas iniciavam o movimento umas em relação às outras. Eles observaram que para uma altura de leito constante com o aumento do adimensional de vibração a U_{mvf} tende a diminuir até $\Gamma = 0,5$, e aumentar para valores maiores Γ , em conformidade com os resultados obtidos por Gupta e Mujumdar (1980a).

Baseados em considerações puramente teóricas, Bratu e Jinescu (1971), propuseram a seguinte equação para prever a velocidade de mínima vibro-fluidização:

$$U_{mvf} = U_{mf} \left(1 - \frac{1+k}{2\pi \cdot j} \cdot \frac{A\omega^2}{g} \right) \quad (2.6)$$

onde:

$$j = \frac{t_1 + t_2}{2 \cdot t_0} \quad (2.7)$$

t_1 = tempo de subida do leito; t_2 = tempo de descida do leito;

k = coeficiente de colisão elástica ($0 < k < 1$), Strumillo e Pakowski (1980), Pakowski *et al.* (1984).

Entretanto, esta equação tem seu uso prático limitado, pois os fatores j e k , devem ser determinados experimentalmente. A vibração ajuda a reduzir a velocidade de mínima fluidização, entretanto o grau de redução é dependente da aceleração vibracional.

Mushtayev *et al.* (1972), propuseram a seguinte correlação para a velocidade de mínima vibro-fluidização.

$$U_{mf} = 52,38 \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_g} \right)^{0,63} \cdot \left(\frac{1}{v_g} \right)^{0,33} \cdot (d_p)^{0,88} \cdot (1 - 0,095 \cdot \Gamma^2) \quad (2.8)$$

onde: d_p , A estão em mm, ρ_s e ρ_g estão em kg/m^3 , f em Hz e v_g em m^2/s .

Os autores utilizaram partículas inertes de PVC e sílica-gel, $A = 0,5$ a $3,0$ mm, $f = 0$ a 60Hz , $d_p = 0,63$, $0,140$, $0,280$ e $0,40$ mm e o parâmetro vibracional variando de 0 a 30 , sendo que, não foi levado em consideração as forças inter-partículas.

2.1.4) Queda de pressão na vibro-fluidização incipiente

Um fenômeno geralmente relatado no estudo dos leitos vibro-fluidizados é a redução da queda de pressão pela vibração. Esta redução é devida ao aumento da porosidade do leito vibro-fluidizado em comparação com o leito fluidizado.

Bratu e Jinescu (1971), avaliaram a queda de pressão na vibro-fluidização incipiente, (patamar mais baixo da curva (c), da figura 2.1), na forma da equação:

$$\Delta P_{mf} = \Delta P_{mf} \cdot \left(\frac{A \omega^2}{g} \right)^{-m} \quad (2.9)$$

onde:
$$m = 0,15 + 24,17 \cdot d_p \cdot \rho_p \quad (2.10)$$

Mushtayev *et al.* (1972), propuseram uma outra equação para a determinação de m:

$$m = 0,41 + 19,6 \cdot d_p \cdot \rho_p \quad (2.11)$$

Quando os valores médios de ΔP_{mvf} são cerca de 40% inferiores aos valores de ΔP_{mf} é utilizada a equação 2.11, ao invés da equação 2.10. Estas diferenças foram observadas por Gupta e Mujumdar (1980a), devido ao fato da altura do leito e a forma das partículas não terem sido levadas em consideração nestas correlações.

Posteriormente, Chevilenko *et al.* (1979), propuseram outra correlação para a determinação de $\square P_{mvf}$, sendo extensivamente citada por outros pesquisadores:

$$\Delta P_{mvf} = 1,967 \cdot (\Delta P_{mf})_t \cdot d_p^{0,11} \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^{0,18} \cdot \left(\frac{A \cdot \omega^2}{g}\right)^{0,51} \quad (2.12)$$

onde:
$$(\Delta P_{mf})_t = \rho_p \cdot (1 - \varepsilon) \cdot H \quad (2.13)$$

Gupta e Mujumdar (1980a) analisaram os resultados obtidos por Chevilenko *et al.* *apud* Pakowski *et al.* (1984), e observaram que dentro das condições operacionais trabalhadas a queda de pressão para o leito vibro-fluidizado é sempre menor que em relação ao leito fluidizado, sendo dependentes mais fortemente da altura do leito e do parâmetro vibracional. Desta análise, eles propuseram a seguinte correlação:

$$\frac{\Delta P_{mvf}}{\Delta P_{mf}} = 1 - 0,0935 \left(\frac{d_p}{L} \right)^{0,946} \Gamma^{0,606} \phi^{1,637} \quad (2.14)$$

onde: ΔP_{mvf} é a queda de pressão na velocidade de mínima vibro-fluididização, ΔP_{mf} a velocidade na mínima fluidização, L o comprimento do leito e ϕ a esfericidade da partícula.

Nesta correlação, $\square P_{mvf}$ corresponde ao patamar superior da curva de fluidização (c) da figura 2.1.

Em todas as investigações relatadas, a queda máxima de pressão foi de cerca de 20 a 30% do valor da queda de pressão obtido para a mínima fluidização, ($\square P_{mf}$).

2.1.5) Análises do comportamento fluidodinâmico dos leitos fluidizado e vibro-fluidizado utilizando curvas de desvio padrão

A utilização de curvas de desvio padrão da queda de pressão no leito fluidizado ou vibro-fluidizado para a análise de curvas características foi utilizada por Garim (1998). Os valores de desvio padrão foram obtidos por intermédio de um transdutor de pressão ligado a um aquisitor de dados, no qual era estipulada uma frequência de coleta em um determinado intervalo de tempo. Posteriormente a média dos valores coletados era obtida e calculado o desvio em relação a esta média.

Os estudos realizados por Garim (1998), Garim e Freire (1998) e Camargo e Freire (2001), permitiram concluir que as curvas de desvio padrão fornecem uma boa representação das mudanças na fluidodinâmica, que podem ocorrer no leito.

Garim (1998) realizou medidas de desvio padrão utilizando um leito retangular, partículas esféricas de vidro, $d_p = 1,1 \times 10^{-3} \text{ m}$ e o adimensional de vibração, Γ , variando de 0 a 1, sendo observado que as curvas de desvio padrão para o leito fluidizado são independentes da altura do leito de partículas e o mesmo aumenta com o aumento do parâmetro vibracional nos leitos vibro-fluidizados, mostrando que a energia vibracional tem uma forte influência nas características fluidodinâmicas do leito, figuras 2.13 e 2.14.

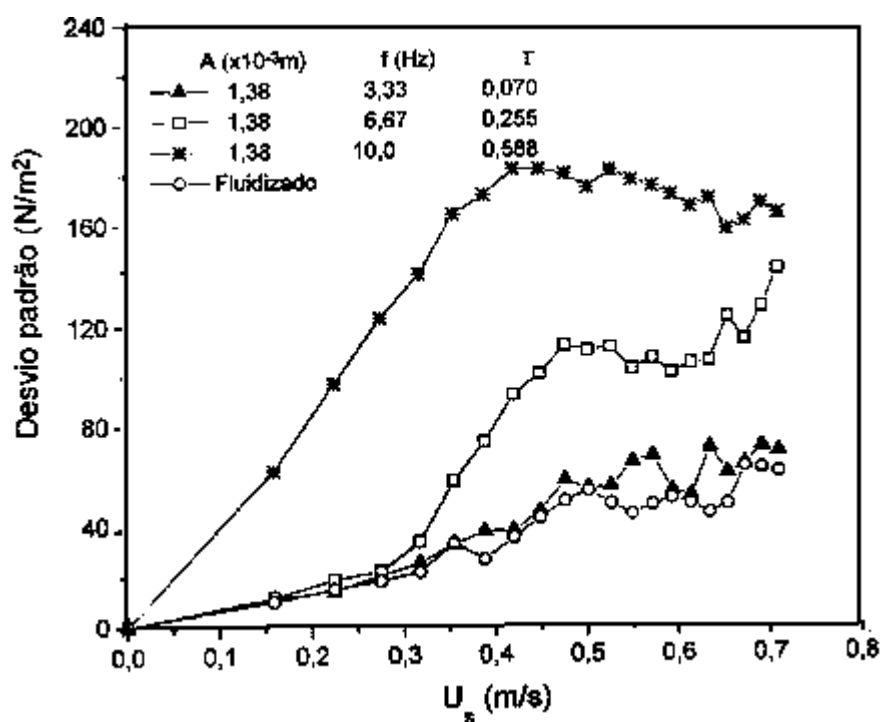


Figura 2.13: Desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado. $A = 1,38 \times 10^{-3} \text{ m}$, $d_p = 1,1 \times 10^{-3} \text{ m}$, (Garim, 1998).

Camargo e Freire (2001) analisaram o comportamento fluidodinâmico do leito vibro-fluidizado, em um leito cilíndrico, utilizando partículas esféricas de vidro com $d_p = 700 \mu\text{m}$, $\rho_s = 2,6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. $A = 10^{-2} \text{ m}$ e as alturas fixadas em $7,0$, $9,0$ e $11 \times 10^{-3} \text{ m}$, respectivamente e Γ , variando de 0 a 6,6. Eles concluíram que quanto maior a altura do

leito de partículas maior é o desvio padrão e que para baixas velocidades de ar e menores valores de frequência de vibração resultaram maiores valores de desvio padrão.

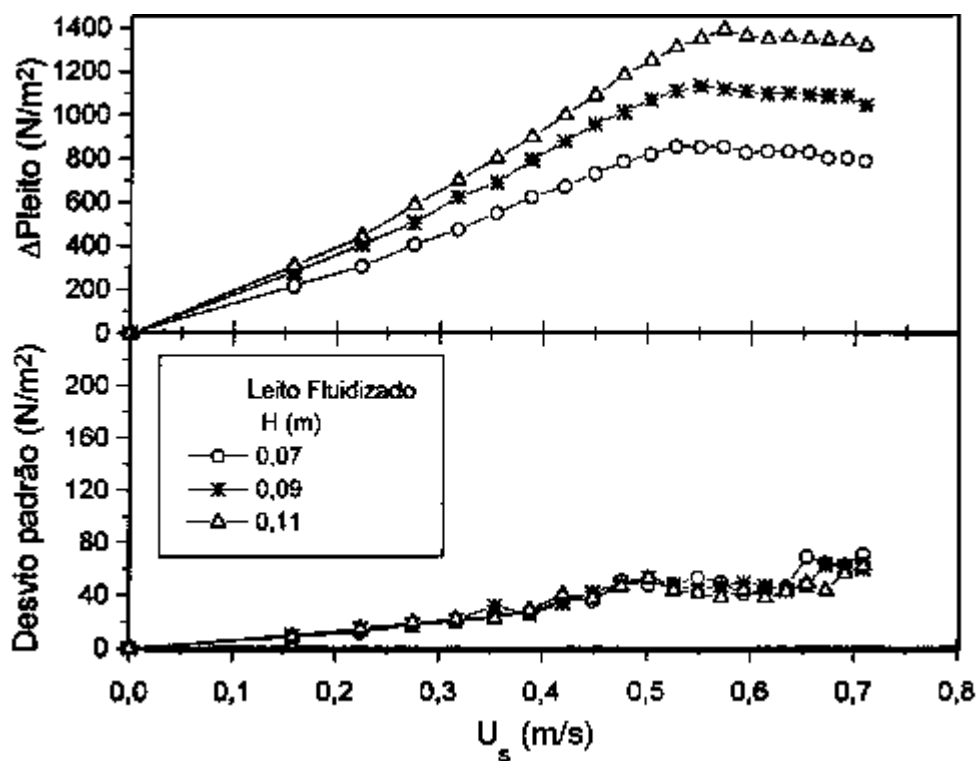


Figura 2.14: Desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar parametrizado na altura do leito de partículas para o leito fluidizado. $d_p = 1,1 \times 10^{-3} m$, (Garim, 1998).

Daleffe (2002) avaliou o comportamento fluidodinâmico dos leitos fluidizado e vibro-fluidizado através das curvas de desvio padrão da queda de pressão no leito em função das variáveis: temperatura, diâmetro das partículas inertes, adimensional de vibração e grau de saturação do líquido. Pôde ser observado que a temperatura não exerce nenhuma influência nas curvas de desvio padrão. Para o leito fluidizado, na ausência de líquido, o desvio padrão apresentou mudanças significativas na região de fluidização bem desenvolvida em função do diâmetro das partículas e praticamente o mesmo

comportamento para baixas velocidades do ar, na região de leito fixo. Para o leito vibro-fluidizado as curvas de desvio padrão mostraram-se muito influenciáveis com o aumento do adimensional de vibração, uma vez que quanto maior o adimensional de vibração maior o valor de desvio padrão obtido. O aumento do grau de saturação de líquido provocou uma redução nos valores de desvio padrão em função do aumento do grau de aderência das partículas estendendo o efeito da aglomeração.

2.1.6) Porosidade dos leitos fluidizados e vibro-fluidizados

A porosidade no leito fluidizado pode ser obtida através da seguinte equação:

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{M_s}{\rho_s H_{mf} A_L} \quad (2.15)$$

onde: ε_{mf} é a porosidade na mínima fluidização, M_s é a massa de partículas no leito, H_{mf} é altura na mínima fluidização e A_L a área do leito fluidizado.

Na equação acima toma-se como referência a velocidade de mínima fluidização, onde para essa velocidade é verificada a expansão do leito em relação à altura inicial do leito de partículas.

Segundo Pakowski *et al.* (1984), para um leito vibrado, sem o escoamento de ar, a porosidade depende da aceleração vibracional imposta ao leito. Na figura 2.15 pode ser observado o comportamento da porosidade do leito como função do adimensional de vibração. Os autores utilizaram partículas de quartzo ($d_p = 0,210-0,355$ mm, $H_0 = 40$ mm). A figura mostra que quanto maior a amplitude de vibração maior a porosidade do leito para uma mesma aceleração vibracional.

Bakhan *et al.* (1970), propuseram uma correlação para a determinação da porosidade para leitos vibrados, na forma:

$$\varepsilon = 0,395 \text{Re}_v^{-0,073} \left(\frac{A}{d_p} \right)^{0,006} (\Gamma)^{0,094} \left(\frac{M}{D^3 \rho_p} \right)^{0,138} \quad (2.16)$$

$$\text{onde: } \text{Re}_v = \frac{\rho_g d_e^2 \omega}{\mu_g} \quad (2.17)$$

A equação 2.16 é válida para leitos cilíndricos e foi obtida utilizando-se partículas de carbeto de sílica ($d_p = 0,08-0,16$ mm, $\rho_p = 3300$ kg/m³, $f = 30-50$ Hz, $A = 0,1-1,3$ mm e $M/D^3 \rho_p = 0.2-1$).

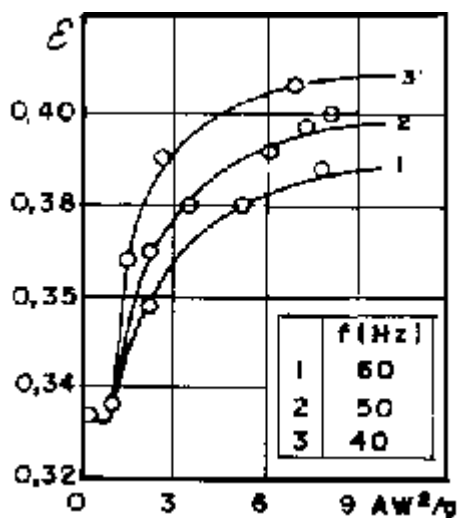


Figura 2.15: Porosidade do leito de partículas em função do adimensional de vibração parametrizado na frequência de vibração. Pakowski *et al.* (1984).

Chevilenko *et al.* (1979) propuseram a seguinte correlação para a determinação da porosidade do leito de partículas:

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon} = 1 - \exp \left[-0,54 \left(\frac{U}{U_{mf}} - 1 \right) (\Gamma)^{0,75 \cdot \frac{U_{mf}}{U}} \right] \quad (2.18)$$

$$\text{onde: } \varepsilon_0 = 1 - \frac{M_s}{\rho_s H_0 A_L} \quad (2.19)$$

Através da influência da velocidade superficial do ar, observaram que para altas vazões de ar não há diferença entre a porosidade de um leito vibrado e de um leito não vibrado.

2.2) Isotermas de equilíbrio

O teor de umidade de equilíbrio de um material pode ser definido como sendo o teor de umidade deste produto depois de exposto a um ambiente com condições de temperatura, pressão e umidades relativas controladas, por um período de tempo suficiente para que ocorra o equilíbrio, ou seja, é o teor de umidade correspondente ao equilíbrio entre as pressões de vapor da água no material e no ambiente. A umidade de equilíbrio estabelece parâmetros (temperatura e umidade relativa) que determinam a umidade em que o material pode ser seco ou, por exemplo, armazenado de forma segura, Mesquita *et al.* (2001).

Em condições específicas o sólido não pode perder uma quantidade de água maior que aquela que tem em equilíbrio com o ar de secagem, ou seja, não pode ter um teor de

umidade menor que o referente à umidade de equilíbrio. Desta forma, a umidade de equilíbrio é que determina o teor mínimo de umidade que o material pode atingir dentro das condições operacionais estabelecidas, sendo de fundamental importância na modelagem do processo de secagem, Prado (1999).

Existem dois métodos clássicos na determinação do teor de umidade de equilíbrio: o método estático e o método dinâmico. No método estático, a umidade de equilíbrio entre o material e a atmosfera é atingida sem a movimentação do ar ou do material; no método dinâmico, o ar, ou o material, é movimentado mecanicamente até que o equilíbrio seja atingido. A vantagem do método estático se deve à maior facilidade de se obter as condições termodinâmicas constantes, Barrozo (1995).

Soluções ácidas ou salinas saturadas são utilizadas para regular a pressão de vapor nas proximidades do material e as condições termodinâmicas constantes são obtidas por meio de uma estufa com controle automático de temperatura. As soluções salinas saturadas são mais utilizadas devido à maior facilidade em se manter a umidade relativa e por questões de segurança no manuseio.

Para a modelagem das curvas de umidade de equilíbrio, têm sido utilizadas relações matemáticas semi-teóricas e empíricas, uma vez que nenhum modelo teórico desenvolvido tem sido capaz de prever com precisão o teor de umidade de equilíbrio. Diversas equações vêm sendo utilizadas para expressar o teor de umidade de equilíbrio em função da temperatura e umidade relativa do ar. Em função da precisão relativa e generalidade de uso, as principais equações são apresentadas no quadro 2.1; onde destacam-se as equações de Henderson, Chung-Pfost e Halsey modificada, por estimarem com boa precisão a umidade de equilíbrio de diversos materiais estudados na literatura, Barrozo (1995), Prado (1999), Mesquita *et al.* (2001).

Quadro 2.1: Equações para determinação da umidade de equilíbrio

Nome	Equação	
Henderson (1952) ¹	$Y_{eq} = \left[\frac{\ln(1-UR)}{-aT_s} \right]^{1/b}$	2.20
Henderson-Thompson (1968) ²	$Y_{eq} = \left[\frac{\ln(1-UR)}{-a(T_s + c)} \right]^{1/b}$	2.21
Chung-Pfost (1967) ³	$Y_{eq} = \frac{-1}{b} \ln \left[\frac{(T_s + c) \ln(UR)}{-a} \right]$	2.22
Clen-Clayton (1971) ⁴	$Y_{eq} = \frac{-1}{cT_s^d} \ln \left[\frac{\ln(UR)}{-aT_s^b} \right]$	2.23
Halsey Modificada (1989) ⁵	$Y_{eq} = \left[\frac{\exp(aT_s + c)}{\ln(UR)} \right]^{1/b}$	2.24
Sabbah (2001) ⁶	$Y_{eq} = \left[\frac{a(UR)^b}{(T_s)^c} \right]$	2.25

1,2,3,4,5 *apud* Barrozo (1995)

6 *apud* Mesquita *et al.* (2001)

Uma das equações mais conhecidas para a previsão de umidade de produtos biológicos é a equação semi-empírica proposta por Henderson, eq.(2.20), baseada no modelo de absorção de Gibbs, e usualmente aplicada a materiais biológicos como por exemplo em Barrozo (1995) e Prado (1999).

Barrozo (1995) apresentou as curvas de isotermas de equilíbrio para sementes de soja, utilizando o método estático com soluções salinas saturadas. Os resultados obtidos

por estimação não linear, pelo método dos mínimos quadrados e por uma análise estatística criteriosa, permitiu concluir que a equação de Halsey-modificada, equação (2.24) foi a que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Prado (1999) apresentou a curvas de isotermas de equilíbrio para sementes de mamão papaya com e sem mucilagem. Os resultados foram obtidos por estimação não linear, conforme Barrozo (1995) e a equação de Halsey modificada foi a que melhor representou os dados experimentais tanto para as sementes sem mucilagem quanto para as sementes com mucilagem.

Os parâmetros das equações foram obtidos para valores de temperatura em graus Celsius, umidade relativa em decimal e umidade de equilíbrio em base seca.

2.3) Cinética de secagem

Conforme Moyers e Baldwin (1999), o termo secagem, aplica-se à transferência de um líquido que está em um sólido úmido para uma fase gasosa não saturada. A secagem de materiais sólidos envolve o transporte simultâneo de calor e massa na forma:

- o calor é transferido do meio para o sólido a fim de evaporar o líquido, e
- a massa de líquido é transferida do sólido para o meio.

Os fatores que governam as taxas destes processos são os que governam a taxa de secagem. O calor necessário é suprido ao material por uma das formas: convecção, radiação e condução.

Os mecanismos internos e os mecanismos externos (temperatura, umidade, etc) de migração de umidade são a base para os estudos de como os sólidos secam. Os procedimentos formais, geralmente requerem um estudo fundamental das condições

internas de fluxo de umidade. A estrutura de um sólido é que determina o mecanismo interno de fluxo de umidade. Estes mecanismos são classificados em:

- mecanismo da difusão - em sólidos homogêneos e contínuos;
- mecanismo da capilaridade - em sólidos porosos e granulares;
- mecanismo de encolhimento e gradientes de pressão, e
- mecanismo por gravidade.

Em geral, um destes mecanismos supracitados, predominam em um intervalo de secagem, mas não é incomum encontrar diferentes mecanismos predominando em diferentes intervalos de tempo durante o processo de secagem.

Segundo Foust *et al.* (1982), na secagem de um sólido úmido, mediante um gás a uma temperatura e a uma umidade fixas, manifesta-se sempre um certo tipo de comportamento. Imediatamente depois do contato entre a amostra e o meio secante, a temperatura do sólido ajusta-se até atingir o equilíbrio entre a superfície e o seu meio exterior, período de indução, trecho AB da figura 2.16. A temperatura do sólido e a velocidade de secagem podem aumentar ou diminuir para chegarem a essa condição de equilíbrio. Neste caso, a temperatura da superfície do sólido é a temperatura de bulbo úmido da corrente gasosa. As temperaturas no interior do sólido tendem a ser iguais à temperatura de bulbo úmido do gás, mas devido às defasagens entre a transferência de calor e massa isso não acontece. Uma vez que a temperatura do sólido tenha atingido a temperatura de bulbo úmido do gás, ela permanece bastante estável e a taxa de secagem também permanece constante; a taxa de água eliminada na unidade de tempo é constante e este período da secagem é o período a taxa constante, trecho BC da figura 2.16. Após este ponto a temperatura da superfície eleva-se e a taxa de secagem cai rapidamente. O período de taxa decrescente, trecho CD da figura 2.16, pode ser mais dilatado que o período de taxa

constante, embora a remoção de umidade possa ser muito menor. É também denominado de “primeiro período de taxa decrescente”, a superfície fica paulatinamente mais pobre em líquido, pois a velocidade do movimento do líquido para a superfície é menor que a velocidade com que a massa é transferida da superfície. No ponto D não há, na superfície, qualquer área saturada no líquido. O vapor, nos níveis mais internos da amostra sólida, difunde-se para a parte da superfície que não está saturada e continua a difundir-se para a corrente gasosa. Este mecanismo é muito lento em comparação com a transferência convectiva que ocorre na superfície saturada.

Nos teores de umidade mais baixos que os do ponto D, toda a evaporação ocorre a partir do interior do sólido. À medida que o teor de umidade continua a cair, a distância a ser coberta na difusão do calor e da massa aumenta dificultando cada vez mais a migração de umidade, até que no limite, quando o sólido chega à umidade de equilíbrio, Y_{eq} , cessando a secagem. O teor de umidade de equilíbrio é atingido quando a pressão de vapor sobre o sólido é igual à pressão parcial do vapor na corrente gasosa. Este período é denominado “segundo período de taxa decrescente”.

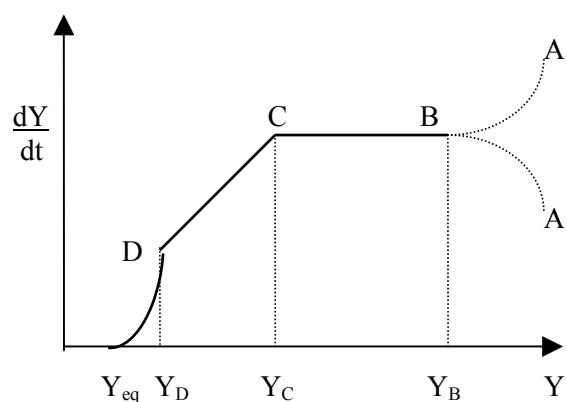


Figura 2.16: Curva típica de taxa de secagem.

A complexidade dos fenômenos de transferência de calor e massa que ocorrem simultaneamente durante o processo de secagem aliado à falta de dados cinéticos contribuem no sentido de dificultar o projeto de secadores e a obtenção da cinética de secagem é de fundamental importância na determinação dos parâmetros que controlam os fenômenos de transferência de calor e massa. A maneira clássica de se abordar o problema é através de experimentos de secagem em camada fina, Prado (1999).

2.3.1) Secagem em camada fina

Nos processos que envolvem a secagem em camada fina, o ar em condições constantes de umidade, temperatura e fluxo mássico atravessa uma fina camada do material úmido. O comportamento do material sob estas condições externas constantes é observado em um determinado intervalo de tempo, Barrozo (1995).

Segundo Prado (1999), o estudo em camada fina e leito fixo cresce de importância quando se trata de materiais, para os quais as informações sobre comportamento cinético são escassas, possibilitando o estudo da influência das variáveis do processo sobre a transferência de massa, uma vez que há amplo controle das condições operacionais e é possível diferenciar os efeitos da temperatura, umidade e velocidade superficial do ar.

Na literatura a maioria dos estudos cinéticos foram realizados em camada fina e diversos modelos empíricos e semi-empíricos são apresentados de forma a descrever a cinética de secagem. O quadro 2.2 apresenta as equações empíricas e semi-empíricas mais utilizadas na predição da cinética de secagem de diversos materiais.

Quadro 2.2: Equações empíricas e semi-empíricas de secagem

Nome	Equação	
Lewis (1921) ¹	$YR = \exp(-Kt)$ onde: $K = A \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right)$	2.26
Brooker <i>et al.</i> (1974) ²	$YR = C \exp(-Kt)$ onde: $K = A \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right)$	2.27
Henderson & Henderson (1968) ³	$YR = C \left[\exp(-Kt) + \frac{1}{9} \exp(-Kt) \right]$ onde: $K = A \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right)$	2.28
Page (1949) ⁴	$YR = \exp(-Kt^n)$ onde: $K = A \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right)$	2.29
Overhults <i>et al.</i> (1973) ⁵	$YR = \left[- (Kt)^n \right]$ onde: $K = \exp\left(A + \frac{B}{T_f} \right)$	2.30
Srzdenicki <i>et al.</i> (1996) ⁶	$YR = a \cdot \exp\left[-K_1 \cdot \exp\left(\frac{-E_1}{T_{ab}}\right) \cdot t \right] + b \cdot \exp\left[-K_2 \cdot \exp\left(\frac{-E_2}{T_{ab}}\right) \cdot t \right]$	2.31
Mancini (1996) ⁷	$YR = \frac{\omega}{\left[1 + (\omega - 1) \exp(-\omega\tau) \right]}$ onde: $\tau = \alpha V_{sp} \frac{(Y_0 - Y_{eq})}{m_{ss}} \cdot t$; $\omega = \frac{\beta}{\alpha - Y_{eq}}$ $\alpha = a_1 + a_2 T$; $\beta = b_1 + b_2 T$	2.32

1,2,3,4,5 *apud* Barrozo (1995)6,7 *apud* Prado (1999)

O parâmetro K apresentado nas equações é denominado de constante de secagem e varia com a temperatura segundo uma função do tipo Arrhenius, para as equações 2.26 a 2.29, para a equação 2.30 a função que representa esta variação é diferente. A equação 2.31

apresenta uma função composta por dois termos do tipo Arrhenius. A equação 2.32 foi proposta utilizando um modelo a duas fases considerando o coeficiente global de transferência de massa como linearmente dependente da temperatura, Prado (1999).

Barrozo (1995) realizou estudos para a determinação da cinética de secagem em grãos de soja em camada fina, leitos fixos e deslizantes. Os resultados da discriminação das equações, utilizando estimação não linear e apuradas técnicas estatísticas, permitiram concluir que o modelo proposto por Overhults foi o que melhor se ajustou aos pontos experimentais tanto para o leito fixo quanto para o leito deslizante.

Prado (1999) apresentou a discriminação dos modelos de secagem para sementes de mamão papaya sem mucilagem, os resultados obtidos permitiram concluir que os modelos utilizados não representavam de forma satisfatória a cinética de secagem das sementes de papaya. Um dos fatores que pode explicar os resultados residem no fato de que os parâmetros das equações do quadro 2.2 apresentam uma dependência somente da temperatura, negligenciando o efeito da velocidade do ar de secagem na cinética das sementes de papaya.

2.3.2) O processo de secagem em leitos fluidizados e vibro-fluidizados

Neste item estão descritas as características peculiares do processo de secagem nos leitos fluidizados e vibro-fluidizados.

A análise da secagem em leitos fluidizados é mais complicada do que a transferência de calor e massa isotérmica analisada isoladamente, pois diferentes mecanismos podem controlar os diferentes regimes de secagem que podem ser observados.

A secagem em leitos vibro-fluidizados propiciou uma nova alternativa tecnológica na secagem de diversos materiais, pois fornece melhores taxas de transferência de calor e massa quando comparados aos leitos fluidizados.

2.3.2.1) Secagem nos leitos fluidizados

Diversos pesquisadores, entre eles destacam-se, Vanecek *et al.* (1966), Kunii e Levenspiel (1991), Kannan *et al.* (1995) e Hovmand (1995) têm estudado o processo de secagem em leitos fluidizados, em função das seguintes vantagens:

- permite controle automático do processo em larga escala, com fácil manuseio;
- não há movimentação mecânica, o que implica em um baixo custo de manutenção;
- rápida troca de calor e massa, o que evita superaquecimento de produtos sensíveis;
- altas taxas de transferência de calor entre o leito e os objetos submersos, e
- a rápida mistura de sólidos permite condições isotérmicas através do leito fluidizado.

Vanecek *et al.* (1966) descrevem o processo de secagem em batelada e contínuo em leitos fluidizados. No processo a batelada, o material úmido é alimentado ao leito e um fluxo de ar percola pelo interior do mesmo, e quando o sólido está suficientemente seco é removido do equipamento. No processo contínuo, o material úmido e o material seco são continuamente alimentados e removidos do leito. Na figura 2.17 está esquematizado o processo de secagem na fluidização, onde o processo de transferência de massa entre as regiões A, B e C, pode ser representada por diferentes mecanismos conforme descrito

anteriormente, mas pode ser descrita com maior frequência através da segunda lei de Fick para a difusão não estacionária:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \nabla^2 C_A \quad (2.33)$$

onde: C_A é a concentração do componente A, D_{AB} é a difusividade mássica de A em B.

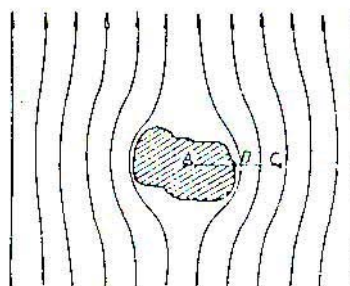


Figura 2.17: Transferência de massa na secagem de uma partícula em um leito fluidizado, (Vaneck *et al.*, 1966).

Segundo Kannan *et al.* (1995) o conhecimento da cinética de secagem é essencial para a estimação do tempo de secagem necessário para reduzir o teor de umidade ao nível desejado. Para que isto seja possível, é necessário conhecer o teor de umidade no período de taxa de secagem constante e no período de taxa de secagem decrescente e a umidade de equilíbrio. Entretanto, estas informações, não estão facilmente disponíveis na literatura de forma a possibilitar uma estimação prévia da cinética de secagem nos leitos fluidizados. Isto faz com que um dos principais objetivos do estudo do processo de secagem em leitos fluidizados seja identificar as influências das diversas variáveis no processo de secagem quando submetidas a diversas condições operacionais.

Kunii e Levenspiel (1991) descrevem os diferentes regimes de fluidização detalhadamente e identificaram, com o apoio de outros pesquisadores, que a transição de um regime a outro, ocorria em função das propriedades do sólido e da velocidade superficial da corrente gasosa.

Hovmand (1995) analisou a influência da velocidade da corrente gasosa no comportamento do leito, o efeito da mistura de partículas no leito e o processo de secagem neste equipamento.

2.3.2.2) Secagem nos leitos vibro-fluidizados

Conforme Gupta e Mujumdar (1980a), a intensa movimentação das partículas no leito vibro-fluidizado reduz a resistência à transferência de calor e massa, aumentando a remoção de umidade das partículas através da redução das zonas de estagnação. A vibração quebra as forças inter-partículas de atração promovendo uma melhor qualidade de fluidização. Como consequência da vibração, a distribuição do tempo de residência no leito será mais uniforme e haverá uma redução significativa da degradação térmica nas zonas de estagnação. Segundo Gupta e Mujumdar (1980a) deve-se ainda observar também que, o aumento da altura do leito de partículas diminui o efeito da vibração e leitos com altura de partículas superiores a 0,5 m são raramente utilizados.

A redução da resistência, em virtude da vibração, faz aumentar a transferência de calor e massa, na fase gasosa principalmente no período de taxa de secagem constante, sendo que, no período de taxa de secagem decrescente, a vibração também auxilia a obtenção de melhores taxas de secagem, Strumillo e Pakowski (1980).

A velocidade do ar de secagem para se obter uma boa movimentação das partículas nos leitos vibro-fluidizados pode ser cerca de 20% menor comparativamente aos leitos fluidizados, possibilitando uma faixa de velocidade mais ampla, impedindo o arraste de partículas e não afetando o tempo de residência do produto no leito, Hovmand (1995).

Erdész *et al.* (1986) apresentaram um conjunto de vantagens na operação com leitos vibro-fluidizados, dentre as quais destacam-se: o tempo de residência, a intensidade de mistura e as propriedades de transferência de calor e massa são controlados pela mudança na amplitude e ou na frequência de vibração; há a possibilidade de se trabalhar com materiais inflamáveis, explosivos ou tóxicos, permitindo um maior controle da poluição e contaminação do meio ambiente.

Han *et al.* (1991) estudaram o efeito do adimensional de vibração na secagem de grãos de trigo e de partículas de BYN, fármaco indicado para rinite, sob as seguintes condições operacionais: $A = 0,65, 0,83$ e $1,01$ mm e um valor constante para a frequência $f = 25$ Hz, obtendo os seguintes valores do adimensional de vibração, $\Gamma = 1,64, 2,08$ e $2,53$, respectivamente. Os resultados obtidos nessas condições estão apresentados nas figuras 2.18 e 2.19. Eles puderam observar que com o aumento do adimensional de vibração houve um aumento significativo da taxa de secagem, no período de taxa de secagem constante, em função do aumento da eficiência da transferência de calor e massa, para ambos os materiais e houve uma melhora na qualidade da fluidização, pois a vibração facilita a percolação de ar no meio, uniformizando o tamanho das bolhas.

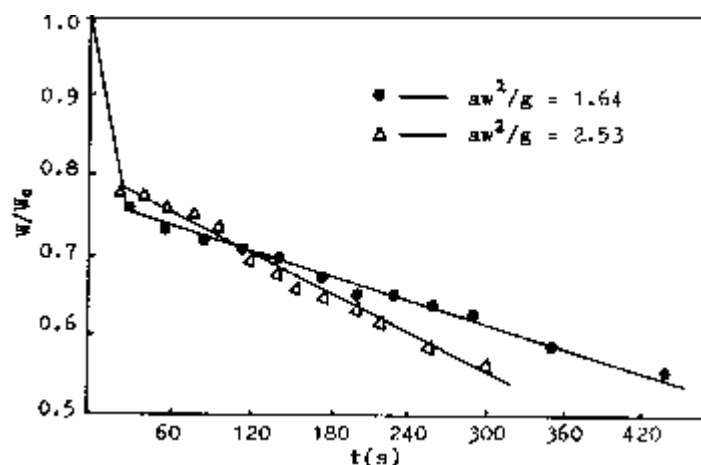


Figura 2.18: Umidade adimensional em função do tempo parametrizado no adimensional de vibração para grãos de trigo, (Han *et al.*, 1991).

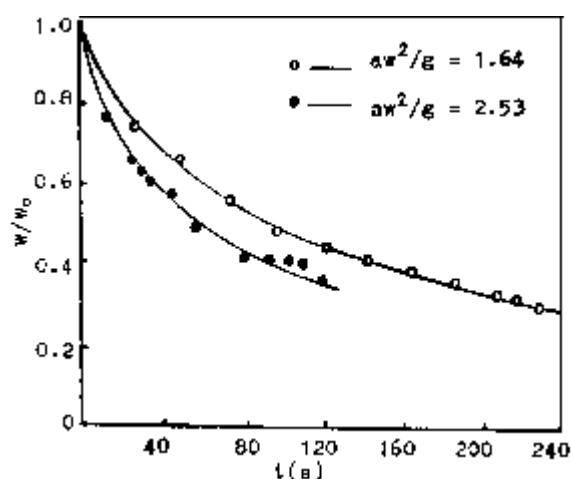


Figura 2.19: Umidade adimensional em função do tempo parametrizado no adimensional de vibração para partículas de BYN, (Han *et al.*, 1991).

2.4) Transferência de calor e massa nos leitos fluidizados e vibro-fluidizados

Em função das diversas vantagens apresentadas na utilização dos leitos fluidizados e vibro-fluidizados e às suas extensas aplicabilidades industriais, vários pesquisadores têm

apresentado vários modelos matemáticos com o intuito de simular a “performance” da secagem nestes equipamentos.

Diversos autores têm estudado os complexos fenômenos de transferência de calor e massa em leitos fluidizados, mas em contra-partida, o estudo dos fenômenos de transferência de calor e massa nos leitos vibro-fluidizados ainda não foi amplamente investigado. Nesse processo, os mecanismos de transferência de calor e massa não são dependentes somente dos parâmetros de vibração (amplitude e frequência), da velocidade e temperatura do ar de secagem, mas também, do material de construção do leito e da higroscopicidade do material, Li e Pan (1996).

Hoebink e Rietema (1980a, 1980b) apresentam um modelo matemático, envolvendo a fase sólida, gás intersticial e bolha, para descrever a secagem em um leito fluidizado. No primeiro estudo eles assumiram que o coeficiente global de transferência de massa é constante, não havendo a limitação da difusão no interior das partículas e, no segundo, o modelo foi estendido de forma a avaliar os efeitos na transferência de massa, quando os efeitos da difusão não são negligenciáveis.

Paláncz (1983) utilizou, para descrever a transferência de calor e massa na fase gasosa, um modelo a três fases, representando a fase bolha, gás intersticial e a fase sólida, em um leito fluidizado contínuo. A fase sólida consiste de partículas sólidas de tamanho e tipo uniforme e foi assumida ser uma mistura perfeita, sendo que as resistências internas à transferência de calor e massa foram negligenciadas em função do tamanho das partículas. A fase bolha consiste de bolhas de tamanhos uniformes e fluxo empistonado não havendo dispersão axial. A fase gás intersticial é uma mistura perfeita e há a transferência de calor e massa entre esta fase e as demais. Os resultados obtidos pela simulação permitiram concluir que, para tornar o modelo mais realista, é necessário levar em consideração os

efeitos das resistências internas às transferências de calor e massa no interior das partículas.

Nikov e Delmas (1987) apresentam um estudo a respeito da transferência de massa líquido-sólido em um leito fluidizado a três fases. Os resultados obtidos mostram que o coeficiente de transferência de massa não foi influenciado pelo diâmetro das partículas e pela vazão de líquido, mas aumentou com o aumento da velocidade do ar em toda a faixa de dados experimentais.

O modelo a duas fases proposto por Massarani e Silva Telles (1992) é composto por uma fase sólida (sólido seco e água líquida) e uma fase gasosa (ar e vapor), sendo que, o modelo associa a cada ponto do sistema uma fase sólida e outra gasosa com velocidade, umidade e temperatura próprias. Este modelo foi utilizado com sucesso na modelagem de secadores em leitos fixos, deslizantes e cruzados.

O modelo a duas fases proposto por Massarani e Silva Telles (1992), apresenta as seguintes hipóteses:

- escoamento unidimensional;
- vazão mássica de ar constante;
- partículas esféricas;
- diâmetro médio constante;
- a área de transferência de calor e massa gás-partícula são iguais, e
- a fase sólida é uma mistura perfeita sem considerar a fase bolha.

O modelo proposto por Massarani e Silva Telles (1992) é composto por um sistema de quatro equações não lineares associado a um conjunto de restrições algébricas que representam as relações de equilíbrio termodinâmico entre as fases e está descrito a seguir:

Balço de massa para a fase s3lida

$$(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial Y_s}{\partial t} = -K_p a (Y_s - Y_{eq}) \quad (2.34)$$

Balço de massa para a fase gasosa

$$\varepsilon \rho_g \frac{\partial Y_g}{\partial t} + G_g \frac{\partial Y_g}{\partial z} = K_p a (Y_s - Y_{eq}) \quad (2.35)$$

Balço de energia para a fase s3lida

$$(1 - \varepsilon) \rho_s (c_{ps} + Y_s c_{pl}) \frac{\partial T_s}{\partial t} = (h_p a - f c_{pv}) (T_g - T_s) - \lambda f \quad (2.36)$$

Balço de energia para a fase gasosa:

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} + \frac{G_g (c_{pg} + Y_g c_{pv})}{\varepsilon \rho_g (c_{pg} + Y_g c_{pv} - R)} \frac{\partial T_g}{\partial z} = - \frac{(h_p a + f c_{pv}) (T_g - T_s)}{\varepsilon \rho_g (c_{pg} + Y_g c_{pv} - R)} \quad (2.37)$$

$$\text{onde: } f = K_p a (Y_s - Y_{eq}) \quad (2.38)$$

$$a = \frac{6(1 - \varepsilon)}{d_p \phi} \quad (2.39)$$

Estas equa33es est33o sujeitas 33s seguintes condi333es iniciais e de contorno:

Iniciais:

$$T_s(z, 0) = T_{so}$$

$$Y_s(z, 0) = Y_{so}$$

Contorno:

$$T_g(0, t) = T_{ga}$$

$$Y_g(0, t) = Y_{ga}$$

E, com a seguinte restri3333o alg3333brica, isoterma de equil3333brio:

$$Y_{eq} = Y_{eq} \left(\bar{T}_g, \bar{UR} \right) \quad (2.40)$$

Tsotsas (1994a, 1994b) desenvolveu um modelo para investigar a transferência de calor e massa na secagem de partículas de alumina, utilizando o conceito de normalização da curva de secagem da partícula, observando-se os efeitos das bolhas durante todo o processo de secagem.

Um estudo experimental da transferência de calor e massa durante a secagem em um leito fluidizado foi feito por Alvarez e Shene (1996), utilizando grãos de soja, filé de peixe e serragem, com diâmetro de partículas variando de 0,51 a $1,53 \times 10^{-3}$ m. Os parâmetros envolvidos na transferência de massa foram estimados através de modelos de secagem baseados em mecanismos que consideram as resistências internas e externas à transferência de massa. Os coeficientes estimados da difusividade efetiva variaram entre $2,0 \times 10^{-11}$ a $1,0 \times 10^{-9}$ m²/s. O coeficiente de transferência de calor foi estimado usando o método dos mínimos quadrados, através de dados experimentais considerando-se somente a taxa de secagem no período constante quando a resistência externa à transferência de massa controla o processo. Os resultados obtidos foram comparados aos das correlações existentes para a predição dos coeficientes de transferência de calor onde somente a transferência de calor foi considerada. Foram avaliadas as correlações para os casos de uma partícula esférica isolada, para leitos fixos e para leitos fluidizados, sendo que os resultados não foram satisfatórios. Isto foi explicado em função da transferência de calor tornar-se menos eficiente durante o processo de secagem comparativamente a um processo onde somente a transferência de calor estiver sendo levada em consideração.

Wildhagen *et al.* (1998), utilizando o modelo proposto por Massarani e Silva Telles (1992), realizaram um estudo sobre a adequação do modelo a duas fases aplicado à secagem em leitos fluidizados, adotando-se a hipótese que a fase sólida é uma mistura perfeita, não levando em consideração a fase bolha. Eles observaram que a secagem depende fortemente da temperatura e da vazão do ar de secagem. Os coeficientes de transferência de calor foram determinados a partir dos dados térmicos e do modelo a duas fases e os resultados obtidos permitem concluir que a correlação obtida deve ser aprimorada para levar em consideração a influência da temperatura. O modelo mostrou-se pouco sensível ao coeficiente volumétrico efetivo de transferência de massa, k_{pa} , indicando que a transferência de calor governa o processo de secagem no leito fluidizado.

Um estudo para a determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa em leito vibro-fluidizado foi realizado por Li e Pan (1996), utilizando sal comum, onde avaliaram as influências do fluxo de ar, da intensidade de vibração e da altura do leito de partículas sobre coeficientes de transferência de calor e massa. As condições operacionais foram estabelecidas em: $f = 0$ a 20 Hz, $A = 0$ a 3,0 mm, $H = 0,02$ a 0,10 m e temperatura de 110°C, utilizando sal comum com teor de umidade inicial de 6% (b.s). A partir dos resultados conclui-se que a velocidade do ar de secagem tem uma forte influência nos coeficientes de transferência de calor e massa, aumentando significativamente os valores dos respectivos coeficientes. O aumento da altura do leito de partículas contribuiu para o decréscimo dos coeficientes de transferência de calor e massa, para uma mesma vazão de ar e adimensional de vibração, pois com o aumento da massa de partículas a área interfacial total do leito não está sendo efetivamente utilizada. A influência do adimensional de vibração foi avaliada para um valor fixo de amplitude, $A = 0,03$ m, e valores crescentes da frequência de vibração, mantendo-se constante a velocidade

superficial do ar de secagem e a altura do leito de partículas. Pôde ser observado que para valores crescentes da frequência de vibração houve um decréscimo nos coeficientes de transferência de calor e massa, quando avaliados no período de taxa de secagem constante, como consequência da ação combinada da velocidade do ar e do adimensional de vibração que são os responsáveis pelas resistências presentes no leito.

Chen *et al.* (2001) utilizaram um modelo hidrodinâmico a duas fases para uma partícula, para simular a secagem de carvão em processo contínuo com vapor superaquecido em um leito fluidizado. O modelo assume que o leito fluidizado é constituído por duas fases: uma fase bolha sem sólidos e uma fase densa constituída por sólidos e gás; os sólidos e o gás na fase densa são uma mistura perfeita; o gás é empistonado na fase bolha e a transferência de calor entre a fase bolha e o gás na fase densa é rápida, e conseqüentemente, a temperatura na fase densa e na fase bolha são iguais.

Wildhagen *et al.* (2000) propuseram um modelo a três fases (sólida, gás intersticial e bolha) para descrever a secagem em um leito fluidizado, sendo que, os resultados obtidos foram comparados relativamente aos dados do estudo do modelo a duas fases realizado por Wildhagen *et al.* (1998). Eles consideraram para o desenvolvimento do modelo que a fase sólida é mistura perfeita e as demais empistonadas. O modelo a três fases apresentou uma melhor qualidade na simulação dos dados experimentais em relação ao modelo a duas fases e os coeficientes de transferência de calor e massa entre a fase sólida e o gás intersticial são dependentes da temperatura e do fluxo mássico da fase gasosa.

Wang e Chen (2000) apresentam um modelo para a secagem de partículas porosas, considerando a temperatura, a umidade de saturação e a distribuição de pressão no interior das partículas. A dinâmica do leito foi simplificada pela consideração de mistura perfeita

sem a presença de bolhas. A transferência de calor e massa foi considerada no interior dos poros das partículas e na interface gás-partícula.

Wildhagen *et al.* (2002) otimizaram o estudo apresentado em Wildhagen *et al.* (2000) para a estimação dos coeficientes de transferência de calor e massa, sendo os parâmetros estimados através da utilização do pacote computacional LSODAR.

A estimação dos coeficientes de transferência de calor e massa na secagem de tapioca em leito fluidizado foi realizada, utilizando um modelo algébrico-diferencial proposto por Vitor *et al.* (2002). Os resultados obtidos das simulações mostraram-se satisfatórios apresentando desvio padrão próximo a 10%.

Bertoldo *et al.* (2002) avaliaram a adequação do modelo proposto por Massarani e Silva Telles (1992) na simulação de secagem de sementes de hortaliças em leito fluidizado; para sementes de agrião com $d_p = 0,6$ mm, $\rho_s = 1100$ kg/m³, $\phi = 0,84$ e $\varepsilon_{mf} = 0,45$. Os resultados obtidos permitem concluir que o modelo matemático apresenta resultados satisfatórios na simulação das propriedades do ar e das sementes durante o processo de secagem.

Calçada *et al.* (2002) apresentaram uma formulação matemática para descrever o processo de secagem durante a eliminação da água de superfície, através de balanços globais de massa e entalpia. Durante a eliminação da água de superfície, todo o calor fornecido ao sólido é consumido para evaporar a água, não existindo a parcela de calor referente ao aquecimento do sólido, portanto a temperatura do mesmo permanece constante durante todo o período de secagem e o ar deixa o secador saturado. A abordagem da secagem via processo de saturação adiabático do ar permite ainda uma boa estimativa dos coeficientes de transferência de calor e massa de modelos matemáticos que descrevem o processo de secagem. Para o leito fixo, a técnica apresentou boas estimativas do

coeficiente de transferência de massa e resultados satisfatórios para o coeficiente de transferência de calor quando comparados com os da literatura.

Kmiec (1975) propõe uma técnica para a determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa em leito de jorro. Esta técnica foi utilizada posteriormente por Serikawa *et al.* (1986) na determinação experimental do coeficiente de transferência de calor em leito de jorro com tubo central, onde os coeficientes de transferência de calor e massa são determinados para o período de taxa de secagem constante.

As equações propostas por Kmiec (1975) são apresentadas para a:

- Determinação do coeficiente de transferência de calor

$$q = h_p a V \Delta T_m \quad (2.41)$$

$$\Delta T_m = \frac{T_{g1} - T_{g2}}{\ln\left(\frac{T_{g1} - T_{gs}}{T_{g2} - T_{gs}}\right)} \quad (2.42)$$

$$q = m_g (Y_2 - Y_1) \lambda \quad (2.43)$$

$$m_g = Q \cdot \rho_{mist} \quad (2.44)$$

- Determinação do coeficiente de transferência de massa

$$k_p = \frac{m_v}{aV\Delta C_m} \quad (2.45)$$

$$m_v = m_g (Y_2 - Y_1) \quad (2.46)$$

$$\Delta C_m = \frac{Y_2 \rho_{g2} - Y_1 \rho_{g1}}{\ln \left(\frac{Y_{vs} \rho_{gs} - Y_1 \rho_{g1}}{Y_{vs} \rho_{gs} - Y_2 \rho_{g2}} \right)} \quad (2.47)$$

onde: a é a área interfacial das partículas, h_p é o coeficiente de transferência de calor, V o volume do leito de partículas, ΔT_m a diferença média de temperatura, q o fluxo de calor, T_g a temperatura do gás, T_{gs} a temperatura do gás na saturação, Q a vazão volumétrica de ar, λ o calor latente de vaporização, m_g a vazão mássica de ar, m_v a taxa de transferência de massa de vapor, k_p o coeficiente de transferência de massa, ΔC_m a concentração de vapor na fase gasosa e Y_{vs} a umidade do gás na saturação.

Concluída a revisão bibliográfica, foi possível fazer as alterações necessárias no leito vibro-fluidizado, além de permitir a visualização de todas as etapas do trabalho. No próximo capítulo serão apresentados os detalhes dos equipamentos utilizados e as metodologias empregadas em todos os procedimentos experimentais realizados neste trabalho.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais, equipamentos e seus periféricos que foram utilizados para a realização deste trabalho. Os ensaios experimentais foram todos executados no Centro de Secagem do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos.

3.1 – Materiais

Para a realização deste trabalho foram utilizadas partículas de alumina ativada do tipo F-200 fornecida pela ALCOA e partículas de sílica-gel branca fornecida pela QEEL.

O diâmetro médio das partículas de alumina e sílica-gel foi obtido utilizando-se a técnica de peneiramento. Para as partículas de alumina, optou-se por trabalhar com o conjunto cujo valor do diâmetro médio foi de $d_p = 3,095 \times 10^{-3}$ m e para as partículas de sílica-gel foram utilizados dois valores de diâmetros médios: $d_p = 2,595 \times 10^{-3}$ e $3,095 \times 10^{-3}$ m, afim de se fazer análises comparativas em função do diâmetro de partículas. A densidade da alumina foi determinada por picnometria gasosa e a densidade da sílica-gel foi determinada por picnometria líquida com água, utilizando-se um picnômetro de 250ml e uma balança analítica modelo FR-200 MKII com precisão de 1×10^{-7} kg. Os valores obtidos para as densidades da alumina e sílica-gel foram, respectivamente, 3.006 kg/m^3 e 2.191 kg/m^3 .

Os conjuntos de partículas estudadas de alumina e sílica-gel enquadram-se no grupo D conforme o método de classificação de partículas proposto por Geldart *apud* Daleffe (2002).

Os ensaios experimentais dos conjuntos de partículas de alumina e sílica-gel, nos leitos fluidizados e vibro-fluidizados, foram conduzidos utilizando-se alturas estáticas de inertes cujos valores foram 0,07, 0,09 e 0,11 m, e cujas alturas correspondem às massas de partículas de alumina e sílica-gel, respectivamente, de: 2,0, 2,5 e 3,0 kg e 1,5, 2,0 e 2,5 kg, aproximadamente.

A esfericidade de ambas as partículas foi determinada via análise de imagens, utilizando o sistema de aquisição de imagens Galai Macro Viewer e do software Image-Pro Plus, através da determinação individual do maior e do menor diâmetro de cada partícula de alumina e sílica-gel analisada. O valor da esfericidade (ϕ) foi obtido através da relação:

$$\phi = \frac{d_m}{d_M} \quad (3.1)$$

onde: d_m é o diâmetro mínimo da partícula e d_M o diâmetro máximo da partícula.

O valor médio obtido para a esfericidade foi de 0,91 para ambos os conjuntos de partículas de alumina e sílica-gel.

3.2) Equipamentos

Neste item são apresentados os equipamentos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. Primeiramente é apresentado o equipamento para a determinação das isotermas de equilíbrio, em seguida, os equipamentos utilizados para a determinação da cinética de secagem e por último o leito vibro-fluidizado.

3.2.1) Isotermas de Equilíbrio

Para a determinação das isotermas de equilíbrio foram utilizados potes cilíndricos de vidro, de $6,0 \times 10^{-2}$ m de diâmetro e $7,0 \times 10^{-2}$ m de altura, conforme apresenta a figura 3.1, na qual coloca-se uma solução salina saturada. A uma distância de $1,0 \times 10^{-2}$ m do nível desta solução saturada havia um suporte plástico perfurado, onde eram acondicionadas as partículas de alumina e sílica-gel, evitando o contato direto com a solução salina. De forma a manter a solução salina homogênea, foram colocados agitadores magnéticos revestidos de teflon no fundo de cada pote de vidro. A massa de partículas em cada recipiente foi em torno de $2,51 \times 10^{-3}$ kg e de $2,20 \times 10^{-3}$ kg para as partículas de alumina e sílica-gel, respectivamente. Os valores utilizados garantem a obtenção de uma monocamada de partículas na superfície do suporte plástico.

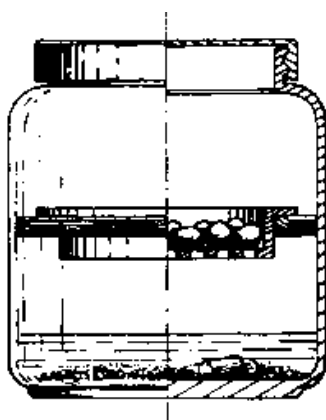


Figura 3.1: Recipiente cilíndrico para determinação das condições de equilíbrio.

Para se atingir as condições de temperaturas estabelecidas foi utilizada uma estufa, modelo Lab-line – Ambi-Hi-Low- Chamber, que possui um sistema de controle automático de temperatura e de circulação de ar.

3.2.2) Cinética de secagem

A figura 3.2 apresenta uma visão geral do equipamento utilizado no estudo da cinética de secagem em camada fina e leito fixo para as partículas de alumina e sílica-gel.

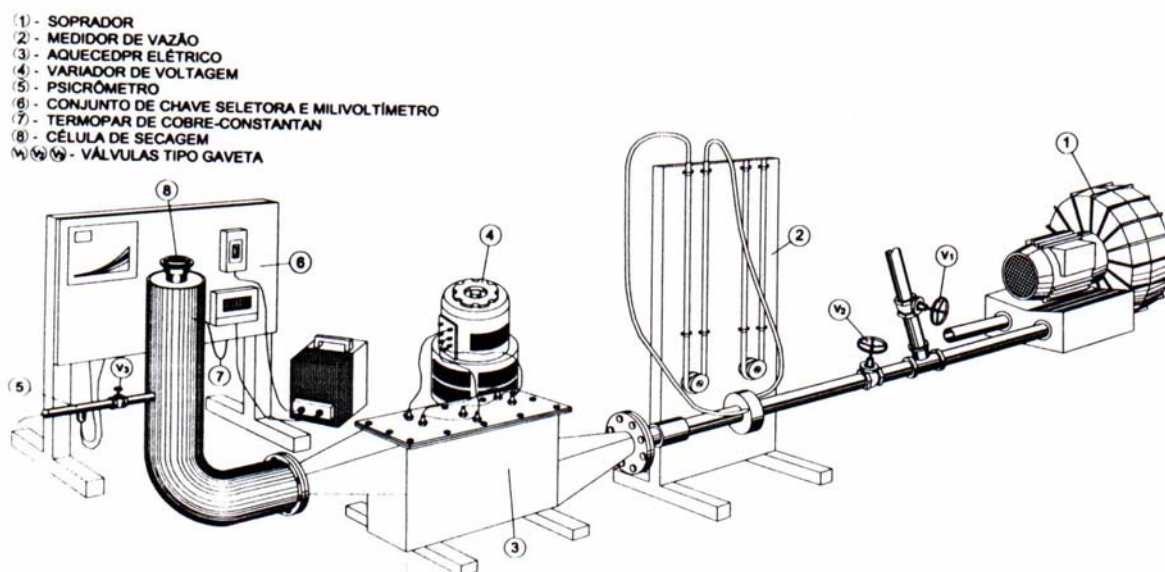


Figura 3.2: Esquema geral do secador em camada fina.

O ar é fornecido ao sistema através de um soprador (1), o qual passa por uma válvula do tipo gaveta (V_2) e através de uma dupla placa de orifício, a qual está conectada a um manômetro de água em U (2). O ar de secagem é aquecido por intermédio de resistências elétricas (3) que estão conectadas a um variador de tensão (4), que permite elevar a temperatura do sistema através da maior ou menor energia dissipada nas resistências. O ar, após passar pelo conjunto de resistências, escoar pelo duto até atingir a célula de medida, onde percola o leito de partículas de alumina ou de sílica-gel efetuando as transferências de calor e massa sendo descarregado na atmosfera.

A válvula tipo gaveta (V_1) instalada à frente do soprador age como um regulador auxiliar de vazão, diminuindo a perda de carga no meio e evitando o aquecimento do gás em função da compressão na válvula principal (V_2).

O duto ascendente, responsável pela homogeneização da velocidade e da temperatura do ar de secagem, está isolado por uma camada de 1,5 cm de espessura de lã de vidro e revestido com folhas de alumínio corrugado de forma a minimizar as perdas energéticas do meio, permitindo uma melhor distribuição de temperatura e velocidade na região de entrada da célula de medida.

Os valores da umidade do ar de secagem são obtidos por meio de um psicrômetro (5), através das medidas das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, por intermédio de termopares de cobre-constantan (7), que estavam ligados a um conjunto de chave seletora e milivoltímetro digital (6).

A temperatura e a velocidade do ar de secagem são determinadas por intermédio de um termoanemômetro, modelo 8525 – CompuFlow - Alnor. O sensor de medida é acondicionado logo abaixo da célula de medida por intermédio de um orifício no duto de distribuição.

A célula de medida é feita de alumínio com 5,2 cm de diâmetro interno e 1,0 cm de profundidade, sendo constituída de duas partes: uma base, que recebe as partículas e uma tampa superior, ambas com a presença de uma tela metálica. A figura 3.3 apresenta o esquema detalhado da célula de medida utilizada nos experimentos de secagem em camada fina.

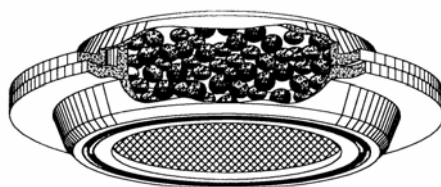


Figura 3.3: Esquema da célula de secagem utilizada na secagem em camada fina.

3.2.3) Leito vibro-fluidizado

O leito vibro-fluidizado utilizado nos experimentos para a caracterização da fluidodinâmica e para a determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa envolvendo o conjunto de partículas de alumina e sílica está representado esquematicamente pela figura 3.4.

O ar de secagem utilizado nos experimentos é injetado ao sistema por intermédio de um soprador (1) de 7,5 cv da marca IBRAM. O ar passa por uma válvula by-pass, que tem por função, auxiliar na regulagem da vazão do mesmo e permitir que o soprador possa continuar funcionando quando o sistema não estiver em operação. Em seguida o ar passa por uma placa de orifício (2), previamente calibrada ($Q = 0,129\sqrt{\Delta h}$, onde $[Q] = \text{m}^3/\text{min}$ e $[\Delta h] = \text{cm}$ coluna d'água), a qual permite obter a vazão de ar no sistema por intermédio da queda de pressão na placa. A mesma está conectada a um manômetro de mercúrio em U (13) e a um transdutor de pressão (14) com faixa de operação de 0-5 psi e de 12-24 V, da marca Auto Tran Incorporated. A presença do manômetro em U permite a calibração do sistema de aquisição de dados e a realização de corridas experimentais caso haja falha do sistema eletro-eletrônico. A queda de pressão na placa de orifício é captada pelo transdutor que envia um sinal elétrico a uma placa de aquisição de dados analógico digital de 12 bits, modelo CA 12-36 fabricada pela Lynx Tecnologia Eletrônica, que está conectada a um computador PC-486 DX (15). Um software, AQDADOS, fabricado pela Lynx Tecnologia Eletrônica, trata os dados recebidos pela placa de aquisição dentro de um intervalo de tempo previamente definido, (300 pontos a cada 3 s), fornecendo como resposta a média aritmética e o desvio padrão dos pontos coletados. Em seguida, o ar de secagem passa por um conjunto de resistências elétricas (3) para o aquecimento e por um trocador de calor (4), que opera com água em contra-corrente. O trocador de calor é

utilizado caso haja a necessidade de um controle mais rígido da temperatura do ar de secagem. Após passar pelo trocador a umidade do ar é aferida por um termohigrômetro – Cole Parmer – modelo 37.950-00 (16) e a corrente de ar é dividida em duas linhas sendo injetada na base do leito vibro-fluidizado (9), abaixo da placa distribuidora de ar, que serve também para sustentar o conjunto de partículas de inertes. A placa distribuidora apresenta perfurações de $0,8 \times 10^{-3}$ m de diâmetro e $2,0 \times 10^{-3}$ m de espessura cuja área perfurada representa 10% da superfície da mesma.

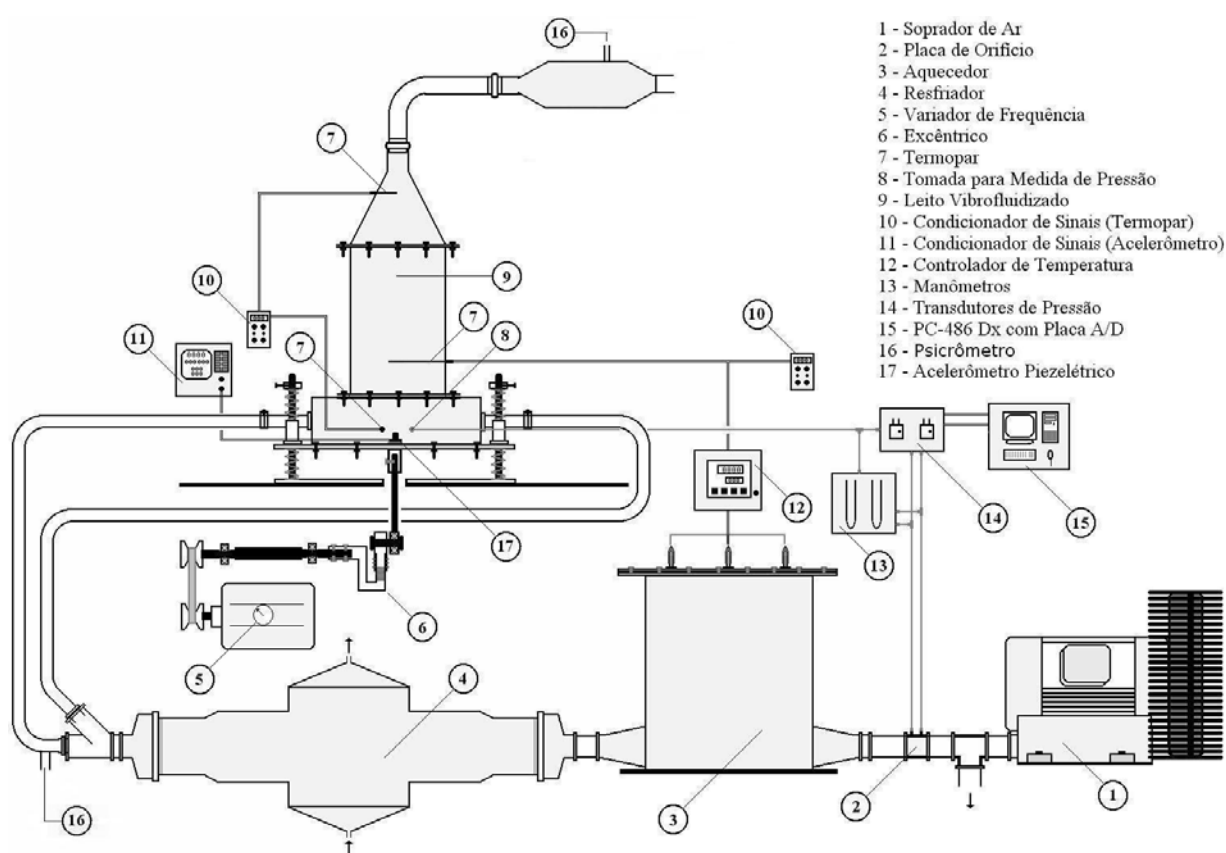


Figura 3.4: Esquema geral do leito vibro-fluidizado.

A queda de pressão no leito vibro-fluidizado é obtida de forma análoga à queda de pressão na placa de orifício, sendo que o manômetro em U utiliza como fluido manométrico a

água e o transdutor operando na faixa de 0-5 psi. Os valores são obtidos por uma tomada da queda de pressão na base do leito, abaixo da placa distribuidora.

De forma a manter a temperatura do ar de secagem constante um termopar tipo T (7), bainha de 0,015 m, foi colocado na base do leito vibro-fluidizado e conectado a um controlador de temperatura Flyever FE50RP (12). Após passar pela placa distribuidora o ar de secagem atinge o interior do leito no qual há dois termopares tipo T, bainha de 0,02 m, que aferem a temperatura do conjunto de partículas e do ar que deixa o leito, ambos previamente calibrados. Os valores obtidos das temperaturas são enviados a um indicador de temperatura (10). Após sair do leito o ar passa por uma tubulação flexível que amortece os efeitos da vibração e adentra um compartimento no qual é aferida a umidade do ar de saída através de um termohigrômetro.

O leito vibro-fluidizado apresenta geometria retangular, (0,20 m de comprimento, 0,11 m de largura e 0,30m de altura), construído em aço carbono galvanizado. As vibrações impostas ao leito foram obtidas por intermédio de uma haste ligada a um mecanismo excêntrico (6) que converte o movimento rotacional de um motor (WEG – 0,5 HP) para um movimento senoidal vertical no leito. O motor é acoplado a um redutor de modelo Ringcogne Modelo RXM-750 (5) que permite trabalhar dentro de uma ampla faixa de frequência. A frequência desejada é obtida utilizando um tacômetro óptico Aptho Taco TO-404. A amplitude de vibração é ajustada no conjunto excêntrico. A resposta do sistema às condições operacionais impostas de frequência e amplitude é dada por intermédio de uma célula piezoelétrica, (previamente calibrada) Brüel & Kjaer, modelo 4371 (17), a qual envia os sinais coletados a um amplificador de sinais, previamente calibrado, Brüel & Kjaer modelo 2525 (11), que fornece os valores de aceleração vibracional (RMS) ou amplitude de vibração (mm). De forma a evitar que as vibrações impostas pelo funcionamento do motor fossem captadas pela célula piezoelétrica, o sistema motor mais conjunto excêntrico foi montado em uma base independente.

Na fase de caracterização fluidodinâmica dos sistemas compostos pelas partículas de alumina e sílica-gel, não foram utilizados os periféricos a partir da parte cônica do leito vibro-fluidizado, sendo adaptado uma tela que impedia o arraste das partículas.

3.3) Metodologia experimental

3.3.1) Fluidodinâmica

A caracterização fluidodinâmica das partículas de alumina e sílica-gel foi realizada em um leito de geometria retangular operando em duas situações distintas: fluidizado, sem vibração e vibro-fluidizado, com vibração. As condições operacionais nas quais os ensaios foram conduzidos estão apresentados no quadro 3.1.

Quadro 3.1: Condições operacionais utilizadas nos ensaios fluidodinâmicos.

Parâmetro	Condições Operacionais
d_p (m) - alumina	$3,095 \times 10^{-3}$
d_p (m) - sílica-gel	$2,595 \times 10^{-3}$ e $3,095 \times 10^{-3}$
Γ	0,0 0,5 1,0 e 1,5
H_0 (m)	0,07 0,09 e 0,11
A (m)	$1,0 \times 10^{-3}$ $2,0 \times 10^{-3}$ e $3,0 \times 10^{-3}$
f (Hz)	0,0 a 17,6
M_s (kg) - alumina	2,0 2,5 e 3,0
M_s (kg) - sílica-gel	1,5 2,0 e 2,5
U (m/s)	0,0 a 1,40

As curvas características, representadas pela variação da queda de pressão de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, e parametrizadas nas diversas variáveis constantes no quadro 3.1 foram obtidas utilizando a metodologia clássica utilizada por Bratu e Jinescu (1971), onde o procedimento experimental consistia em deixar o leito, carregado de partículas, atingir o regime permanente e após isso o leito de partículas era expandido e as leituras de queda de pressão no leito e na placa de orifício eram aferidas para vazões decrescentes de ar até zero, com o auxílio de transdutores, que enviava os sinais até a placa de aquisição de dados e do software AQDADOS; que também fornecia os valores dos desvios padrões para cada conjunto de 300 pontos coletados em intervalos de três segundos.

De acordo com os testes de estabilidade estrutural realizado por Daleffe (2002), não se trabalhou com valores do adimensional de vibração, Γ , acima de 1,5.

3.3.2) Isotermas de equilíbrio

A metodologia utilizada nesta etapa baseou-se nos trabalhos realizados por Barrozo (1995), Prado (1999) e Mesquita *et al.* (2001), para sementes de soja, papaya e jacarandá-da-Bahia, respectivamente.

O método utilizado para a determinação das condições de equilíbrio foi o método estático, com a utilização de soluções salinas saturadas, mediante o processo de dessorção de umidade das partículas de alumina e sílica-gel. O conjunto das sete soluções salinas utilizadas juntamente com as respectivas umidades relativas para os três níveis de temperatura nas quais foram conduzidos os ensaios experimentais encontra-se no quadro 3.2. Para cada solução salina foram utilizadas três amostras de forma a garantir a reprodutibilidade dos experimentos.

As partículas de alumina e sílica-gel foram pesadas em uma balança analítica FR200-MKII de precisão de $1,0 \times 10^{-7}$ kg e foram acondicionadas no suporte plástico no interior dos potes de vidros, hermeticamente fechados, sendo os mesmos colocados em uma estufa, com controle de temperatura. O teor de umidade das partículas de alumina e sílica-gel apresentava sempre valores superiores aos de equilíbrio, de forma a garantir o processo de dessorção.

As partículas de alumina e sílica-gel ficaram de 16 a 22 dias e de 16 a 28 dias, respectivamente, em condições termodinâmicas constantes. As soluções salinas foram homogeneizadas diariamente sendo que, as condições de equilíbrio foram consideradas atingidas quando três valores consecutivos de pesagem de cada amostra apresentavam resultados aproximadamente iguais. As pesagens foram realizadas em intervalos de dois dias, a partir do quinto dia. Após as condições de equilíbrio terem sido atingidas a umidade de cada amostra foi determinada pelo método direto da estufa, $105,0 \pm 3,0^\circ\text{C}$, por um período de 24 horas. Este mesmo procedimento foi adotado para as três faixas de temperatura nas quais foram conduzidos os ensaios experimentais: $30,0$, $45,0$ e $60,0^\circ\text{C}$.

Os resultados obtidos dos ensaios experimentais foram utilizados na estimação dos parâmetros das equações encontradas na literatura, com o intuito de se obter o melhor modelo que se ajuste aos dados de equilíbrio. As equações mais utilizadas encontram-se dispostas no quadro 2.1, equações 2.20 a 2.25.

Quadro 3.2: Umidade relativa das soluções salinas em função da temperatura.

Solução Salina	Temperatura (°C)		
	30	45	60
LiCl	0,113	0,111	0,096
C ₂ H ₃ O ₂ K	0,216	0,195	0,175
MgCl ₂ .6H ₂ O	0,324	0,314	0,295
K ₂ CO ₃	0,432	0,432	0,421
NaNO ₂	0,635	0,603	0,565
NaCl	0,750	0,747	0,703
KCl	0,834	0,808	0,751

Fonte: Barrozo (1995).

3.3.3) Cinética de secagem

3.3.3.1) Secagem em camada fina

As partículas de alumina foram umidificadas por imersão direta em água por um período de três horas, após o qual foram dispostas em um suporte para eliminar o excesso de água por um período de 8 a 12 horas. As partículas de sílica-gel foram umidificadas através do contato com o ar ambiente próximo da saturação por um período de 24 horas, em virtude das mesmas não suportarem a imersão direta em água, o que ocasiona a ruptura de sua estrutura.

O processo de secagem em camada fina foi dividido em duas etapas, a primeira consistiu na estabilização térmica do sistema, onde o soprador e o conjunto de resistências foram ligados e a vazão ajustada de modo a atingir as condições de temperatura e velocidade do ar de secagem desejadas. Após a estabilização do sistema foram realizadas as medidas de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido do ar. A segunda etapa do processo iniciou-se com a pesagem de uma

amostra de partículas, as quais foram inseridas na célula de secagem e a mesma foi acoplada à unidade dando-se início ao processo de secagem. Em intervalos de tempo pré-determinados a célula de medida era retirada e a sua massa aferida em uma balança analítica, GEHAKA – BG-440 de precisão de 10^{-6} kg. Quando da retirada da célula de medida, uma célula auxiliar, idêntica à célula de medida, foi acoplada à unidade de forma a manter o equilíbrio térmico e fluidodinâmico do sistema. Ao final de cada ensaio a massa de material seco foi determinada através do método direto da estufa, $105,0 \pm 3,0^{\circ}\text{C}$, por 24 horas.

Os ensaios experimentais foram realizados para cinco níveis de velocidade do ar de secagem: 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 e 2,5 m/s e três níveis de temperatura: 60,0, 80,0 e $100,0^{\circ}\text{C}$. Para cada ensaio foram feitas réplicas de forma a garantir a reprodutibilidade dos experimentos.

Os resultados obtidos foram utilizados na discriminação das equações utilizadas na literatura, quadro 2.2, equações 2.26 a 2.32, de forma a obter a melhor equação que represente os dados experimentais.

3.3.3.2) Cinética de secagem nos leitos fluidizados e vibro-fluidizados

As condições operacionais nas quais foram realizados os ensaios experimentais nos leitos fluidizados e vibro-fluidizados estão descritos no quadro 3.3.

As partículas de alumina e sílica-gel foram umidificadas conforme descrito no item anterior e acondicionadas em um reservatório plástico de forma a evitar a perda de umidade.

Os ensaios experimentais foram divididos em duas partes, sendo que na primeira, as condições operacionais para cada estudo foram impostas e uma corrente de ar bem distribuída, de temperatura constante, foi injetado no interior do leito. Na segunda parte, atingidas as condições de regime estacionário, as partículas de inertes com temperatura e umidade iniciais

conhecidas foram inseridas no interior do leito, dando início ao processo de secagem. Em intervalos de tempo pré-determinados, foram aferidas as temperaturas no interior e na saída do leito, a umidade relativa do ar de secagem (através de um termohigrômetro), a temperatura e a umidade do sólido.

Quadro 3.3: Condições operacionais utilizadas nos ensaios de cinética de secagem.

Parâmetro	Condições Operacionais
d_p (m) - alumina	$3,095 \times 10^{-3}$
d_p (m) - sílica-gel	$2,595 \times 10^{-3}$
Γ	0,0 0,5 1,0 e 1,5
H_0 (m)	0,09
A (m)	$3,0 \times 10^{-3}$
f (Hz)	0,0 6,08 8,91 e 10,93
M_s (kg) - alumina	2,5
M_s (kg) - sílica-gel	2,0
T_{gb} (°C)	70,0
U (m/s)	1,34 a 1,35

A temperatura das partículas foi determinada via calorimetria. As amostras foram coletadas (cerca de 30g) através de um orifício na lateral do leito e acondicionadas em um recipiente de isopor, no interior do qual havia um termopar (tipo T). O recipiente foi imediatamente fechado até que uma temperatura de equilíbrio fosse atingida, sendo esta, considerada a temperatura do sólido.

Das amostras coletadas, 13 amostras para cada experimento, cerca de 20g eram retiradas para a determinação da umidade do sólido ao longo do ensaio experimental. As umidades das

partículas foram determinadas pelo método direto da estufa, $105,0 \pm 3,0^\circ\text{C}$, por 24 horas. As pesagens das amostras foram realizadas em uma balança analítica FR200-MKII de precisão de $1,0 \times 10^{-7}$ kg.

3.3.3.3) Determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa

A determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa foi realizada utilizando a metodologia proposta por Kmiec (1975), onde para cada ensaio, mediu-se, em função do tempo a umidade do material, as temperaturas do ar na entrada e na saída do leito, a umidade relativa e a vazão de ar. As medidas realizadas no período de taxa de secagem constante, foram utilizadas para os cálculos dos coeficientes de transferência de calor e massa.

Os procedimentos para a determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa são descritos a seguir:

- determina-se por regressão linear, a partir dos resultados da cinética de secagem, o período de taxa de secagem constante, admitindo coeficiente de correlação no mínimo de $R^2 = 0,99$;
- determina-se, com as condições do ar de entrada, a temperatura de bulbo úmido e as pressões parciais do ar e do vapor d'água, através das equações

$$UR = \frac{P_w}{P_{ws}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

onde

$$P_{ws} = \exp\left(\frac{C_1}{T} + C_2 + C_3 T + C_4 T^2 + C_5 T^3 + C_6 \ln T\right) \quad (3.3)$$

T a temperatura em Kelvin e as constantes assumem os valores

$C_1 = -5,8002206 \times 10^3$	$C_3 = -4,8640239 \times 10^{-2}$	$C_5 = -1,4452093 \times 10^{-8}$
$C_2 = 1,3914993$	$C_4 = 4,1764768 \times 10^{-5}$	$C_6 = 6,5459673$

Fonte: ASHRAE (1997)

assumindo que

$$P_T = 1,0 \text{ atm} = P_g + P_w \quad (3.4)$$

tem-se a pressão parcial do ar na mistura gasosa;

- determinam-se as frações molares e as frações mássicas de cada componente para o cálculo da densidade da mistura, nas condições de entrada, saída e na saturação;

$$w_i = y_i \frac{PM_i}{PM_{mist}} \quad (3.5)$$

$$\rho_{mist} = \rho_w w_w + \rho_g w_g \quad (3.6)$$

- determina-se a temperatura de saturação e umidades absolutas na entrada e na saída do leito, nas condições de taxa de secagem constante, através do “software” CATT2, versão 1.0, 1997;
- determina-se a porosidade do leito fluidizado utilizando-se a equação 2.15, através do método de volumetria; para o leito vibro-fluidizado, a porosidade foi estimada através das equações 2.18 e 2.19;
- determinam-se a área interfacial das partículas, a temperatura média, a vazão mássica de ar e o fluxo de calor, respectivamente, utilizando-se as equações 2.39, 2.42, 2.44, e 2.43 onde o calor latente de vaporização é determinado na temperatura de saturação;

- calcula-se o coeficiente de transferência de calor através da equação 2.41, onde V , é o volume do leito de partículas, e para o cálculo do fluxo de calor, lembrando do isolamento térmico do leito e do pequeno gradiente de temperatura das partículas dentro do intervalo considerado, as parcelas referentes ao aquecimento das partículas e das perdas foram consideradas desprezíveis em relação à parcela referente à mudança de fase, portanto a equação 3.7, reduz-se à equação 2.43

$$q = m_g (Y_2 - Y_1) \lambda + M_s c_p \Delta T + q_{perdas} \quad (3.7)$$

- calcula-se a umidade de saturação pela equação

$$Y_{vs} = 0,62198 \frac{P_{ws}}{(P_T - P_{ws})} \quad (3.8)$$

- determinam-se a vazão mássica de vapor d'água e a concentração média de vapor na fase gasosa, a partir das equações 2.46 e 2.47, e
- para o cálculo do coeficiente de transferência de massa utiliza-se a equação 2.45.

3.3.3.4) Estimação dos perfis de umidade e temperatura do sólido

Os perfis de umidade e temperatura dos sólidos foram estimados utilizando o modelo proposto por Massarani e Silva Telles (1992), equações 2.34 a 2.40, por intermédio de um “software” elaborado em Matlab.

Para a estimação dos perfis de umidade e temperatura dos sólidos utilizaram-se os coeficientes de transferência de calor e massa, determinados experimentalmente de acordo com a metodologia proposta por Kmiec (1975).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados neste capítulo estão divididos em quatro partes. A primeira compreende a análise da fluidodinâmica das partículas de alumina e sílica-gel e também as análises das respectivas curvas de desvio padrão. Nesta parte é feita uma avaliação do comportamento fluidodinâmico do leito quando submetido a variações de amplitude e frequência vibracional, altura do leito de partículas e diâmetro das partículas, (somente para as partículas de sílica-gel). A segunda parte consiste na obtenção experimental das isothermas de equilíbrio para as partículas de alumina e sílica-gel. A terceira é destinada à obtenção da cinética de secagem das partículas de alumina e sílica-gel em leito fixo e ao ajuste de um modelo cinético semi-empírico aos dados experimentais obtidos. Na última parte é feita a determinação dos perfis de umidade e temperatura dos sólidos nos leitos fluidizados e vibro-fluidizados, juntamente com a análise do modelo matemático utilizado.

4.1) Fluidodinâmica

A curvas características e as curvas de desvio padrão dos leitos fluidizado e vibro-fluidizado foram obtidas utilizando partículas de diferentes tamanhos: alumina ($d_p = 3,095 \times 10^{-3}$ m) e sílica-gel ($d_p = 2,595 \times 10^{-3}$ e $3,095 \times 10^{-3}$ m). Nas curvas obtidas foram analisadas as influências dos diversos parâmetros: amplitude e frequência vibracional e conseqüentemente o efeito da vibração, a altura do leito de partículas e o diâmetro das partículas.

Dentro deste contexto são apresentados os resultados típicos, sendo que os demais resultados são encontrados no Apêndice A.

As figuras 4.1 e 4.2 apresentam curvas típicas de queda de pressão para o leito fluidizado com as partículas de alumina e sílica-gel respectivamente, onde se pode identificar as regiões de transição de leito fixo para leito fluidizado. As curvas obtidas são semelhantes aos resultados encontrados por Strumillo e Pakowski (1980), figura 2.1.a. Em ambos os casos verificam-se a boa reprodução dos dados experimentais, através das curvas de réplicas obtidas. As velocidades de mínima fluidização obtidas em cada caso foram de 1,12 m/s para as partículas de alumina e de 0,90m/s para as partículas de sílica-gel nas condições experimentais propostas.

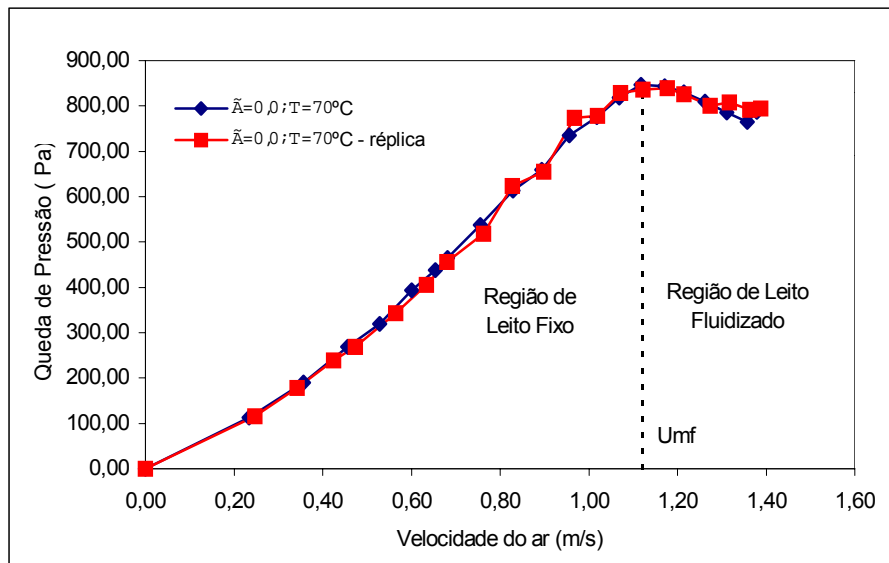


Figura 4.1: Queda de pressão em função da velocidade do ar para o leito fluidizado e respectiva réplica. Partículas de alumina. $d_p = 3,095 \times 10^{-3} \text{ m}$; $H = 9,0 \text{ cm}$.

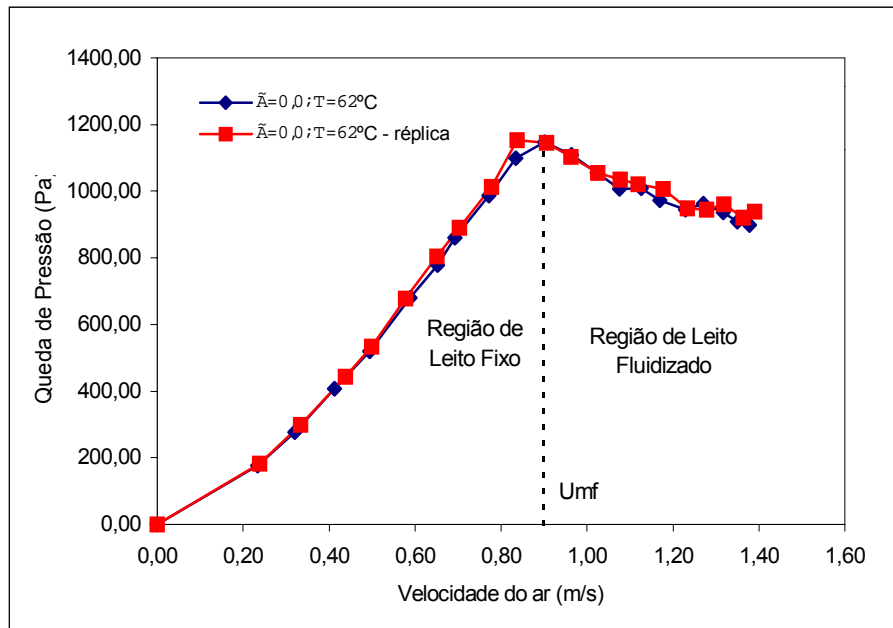


Figura 4.2: Queda de pressão em função da velocidade ar para o leito fluidizado e respectiva réplica. Partículas de sílica-gel $d_p = 2,595 \times 10^{-3} \text{ m}$; $H = 11,0 \text{ cm}$.

As figuras 4.3 e 4.4 apresentam as curvas de desvio padrão dos dados experimentais das partículas de alumina e sílica-gel, respectivamente. Um comportamento típico pode ser observado nestes casos; quando o leito se comporta como um leito fixo os desvios padrões obtidos apresentam baixos valores, de 4,0 a 27,0 Pa para as partículas de alumina e de 3,0 a 19,0 Pa para as partículas de sílica-gel e quando os mesmos atingem o regime de transição e posteriormente a fluidização bem desenvolvida, os desvios padrões aumentam significativamente com o aumento da velocidade do ar, apresentando um comportamento oscilatório (mais evidente na figura 4.4), em virtude do movimento caótico das partículas dentro do leito.

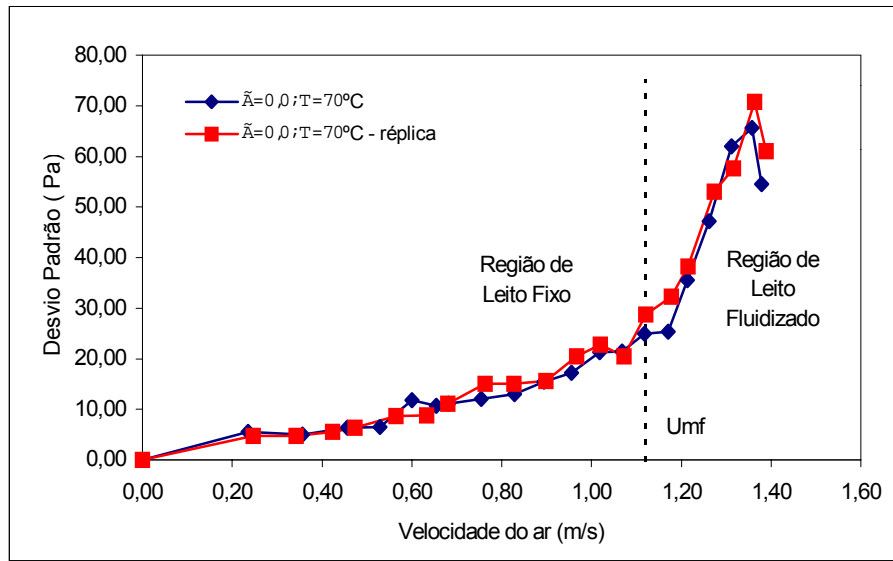


Figura 4.3: Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado e respectiva réplica. Partículas de alumina. $d_p = 3,095 \times 10^{-3} \text{m}$; $H = 9,0 \text{ cm}$.

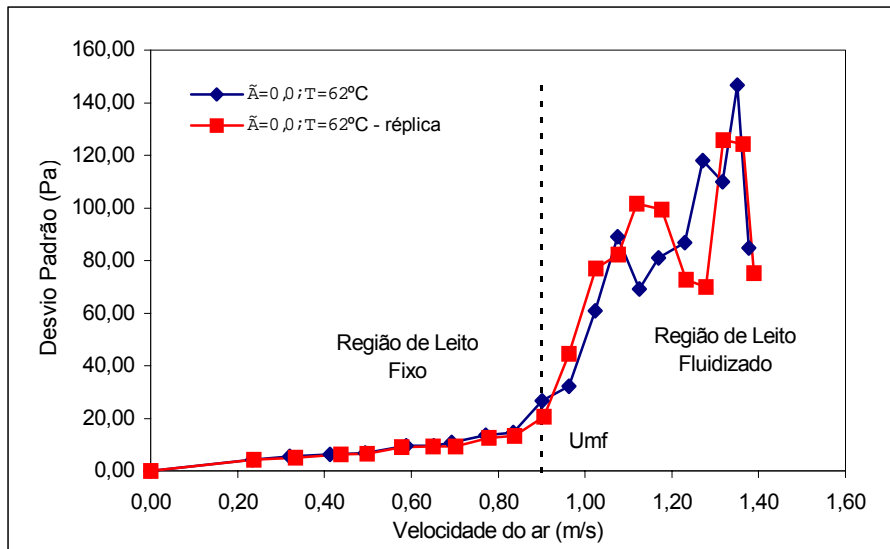


Figura 4.4: Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado e respectiva réplica. Partículas de sílica-gel. $d_p = 2,595 \times 10^{-3} \text{m}$; $H = 11,0 \text{ cm}$.

As figuras 4.5 e 4.6 apresentam o comportamento fluidodinâmico do leito para as partículas de alumina e sílica-gel, respectivamente, quando o mesmo foi submetido à ação da energia vibracional. Os resultados obtidos foram semelhantes aos encontrados por Strumillo e Pakowski (1980), (curva b, figura 2.1). Em virtude da energia vibracional, que favorece a percolação do ar através do leito e a redução da queda de pressão no mesmo, pode ser observado nas figuras 4.5 e 4.6 a redução das velocidades de mínima fluidização, alumina: 1,08m/s e sílica-gel: 0,82m/s; resultados estes em conformidade com a literatura, Camargo (1998).

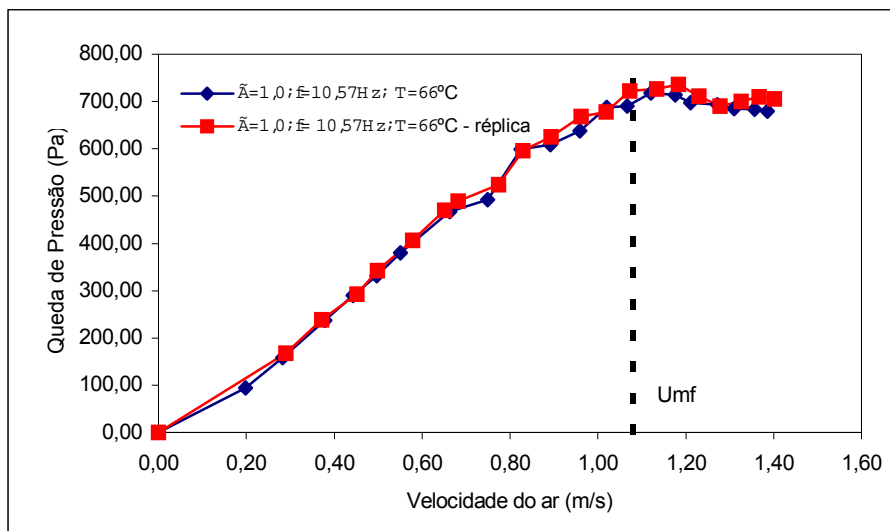


Figura 4.5: Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado e respectiva réplica. Partículas de alumina. $d_p = 3,095 \times 10^{-3}$ m; $H = 9,0$ cm; $A = 2,0$ mm.

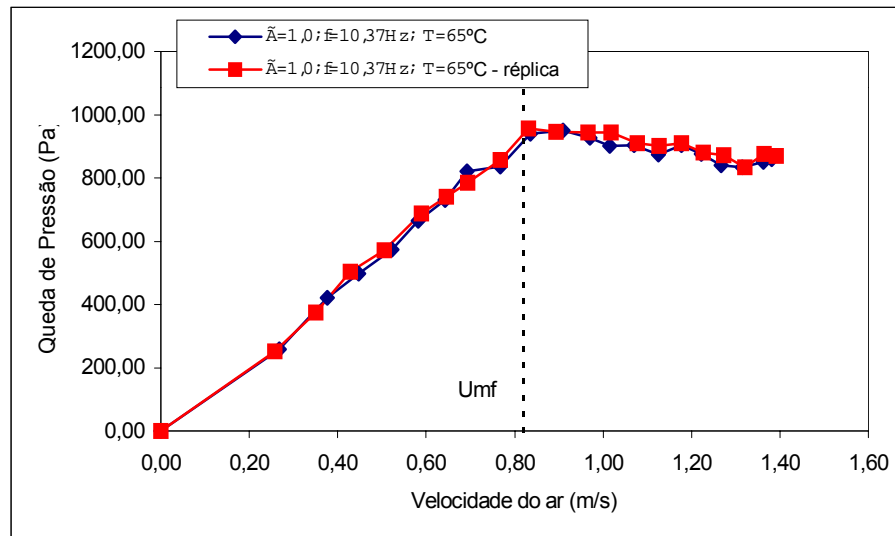


Figura 4.6: Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado e respectiva réplica. Partículas de sílica-gel $d_p = 2,595 \times 10^{-3}$ m; $H = 11,0$ cm; $A = 2,0$ mm.

As curvas de desvio padrão da queda de pressão para o leito vibro-fluidizado estão representadas pelas figuras 4.7 e 4.8. Observa-se nas figuras que os desvios padrões obtidos foram aumentando de forma gradativa até a velocidade de 0,50 m/s para as partículas de alumina e 0,40 m/s para as partículas de sílica-gel; após estes valores os desvios padrões aumentaram com o aumento da velocidade do ar, demonstrando que a partir destes pontos tanto a velocidade do ar como a energia vibracional exercem forte influência sobre a fluidodinâmica do leito. Observa-se que nestas condições operacionais não foi permitido visualizar a região de transição do leito fixo para o leito fluidizado como apresentado nas figuras 4.3 e 4.4, mas é possível visualizar as velocidades do ar nas quais têm início o movimento relativo das partículas no interior do leito, contribuindo para o aumento dos valores do desvio padrão.

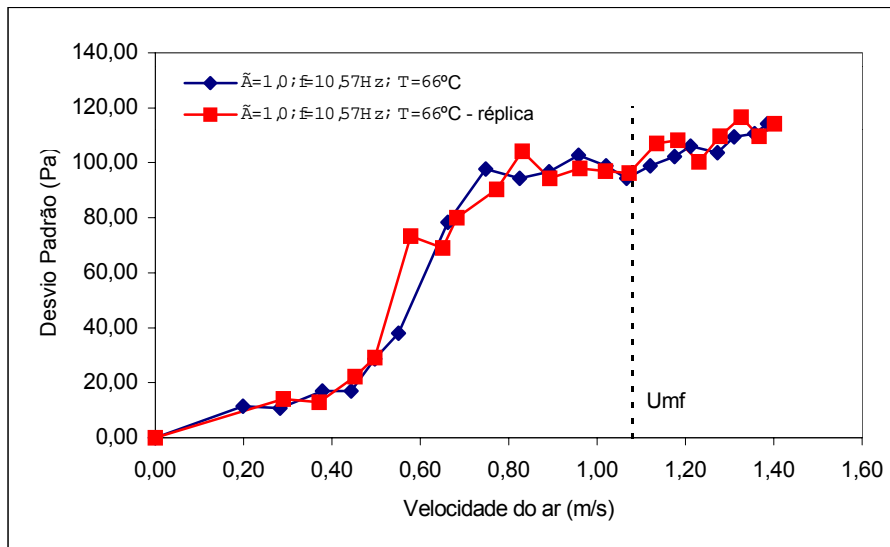


Figura 4.7: Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado e respectiva réplica. Partículas de alumina $d_p = 3,095 \times 10^{-3} \text{m}$; $H = 9,0 \text{ cm}$; $A = 2,0 \text{ mm}$.

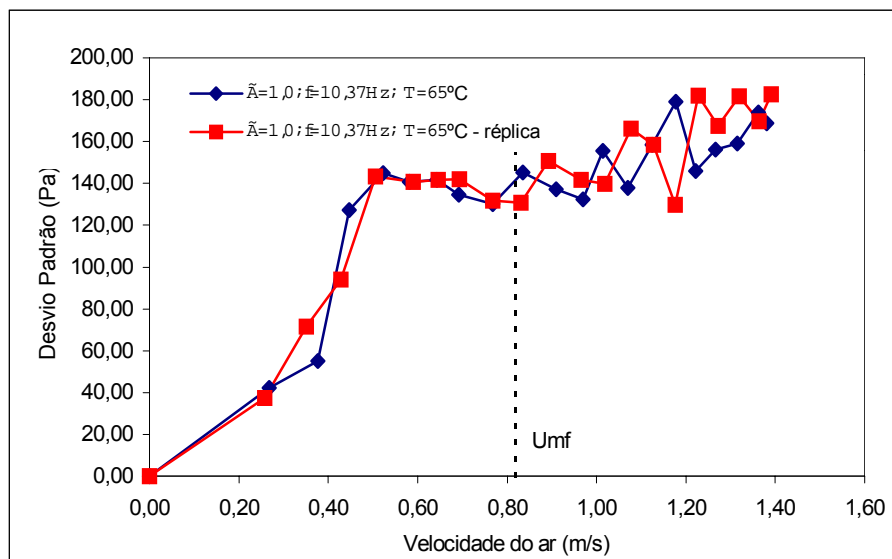


Figura 4.8: Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado e respectiva réplica. Partículas de sílica-gel $d_p = 2,595 \times 10^{-3} \text{m}$; $H = 11,0 \text{ cm}$; $A = 2,0 \text{ mm}$.

A análise do comportamento fluidodinâmico dos leitos fluidizado e vibro-fluidizado quando submetidos à variação dos parâmetros operacionais: amplitude e frequência vibracional, altura do leito de partículas e densidade das partículas foi efetuada e os resultados obtidos são discutidos e comparados aos resultados presentes na literatura.

As curvas características dos leitos fluidizado e vibro-fluidizado foram obtidas para três alturas do leito de partículas (0,07, 0,09 e 0,11 m), três valores de amplitude (1×10^{-3} , 2×10^{-3} e 3×10^{-3} m), dois valores de diâmetros de partículas ($d_p = 3,095 \times 10^{-3}$ m – alumina; $d_p = 2,595 \times 10^{-3}$ e $3,095 \times 10^{-3}$ m – sílica-gel) e para quatro diferentes valores do adimensional de vibração (0,0, 0,5, 1,0 e 1,5).

4.1.1) Influência da altura de partículas no comportamento fluidodinâmico do leito

O comportamento fluidodinâmico dos leitos fluidizado e vibro-fluidizado em função da altura do leito de partículas foi obtido para as partículas de alumina ($d_p = 3,095 \times 10^{-3}$ m) e as partículas de sílica-gel ($d_p = 2,595 \times 10^{-3}$ m).

Nas figuras 4.9 e 4.10 estão apresentados os resultados obtidos para o comportamento fluidodinâmico do leito fluidizado em função da altura do leito de partículas. Pode ser observado que a queda de pressão em ambos os casos aumentou com o aumento da altura do leito, resultado este fisicamente esperado, pois com o aumento da altura do leito e, conseqüentemente da massa de partículas, necessita-se de uma força maior para suspender o conjunto de partículas. A velocidade de mínima fluidização obtida em ambos os casos mostrou-se pouco influenciável pela altura do leito de partículas. No caso das partículas de alumina, figura 4.9, o valor obtido é de aproximadamente 1,12 m/s nas três alturas estudadas; já para as partículas de sílica-gel, figura 4.10,

os valores variaram de 0,83m/s a 0,90m/s. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Garim (1998) e Camargo (1998).

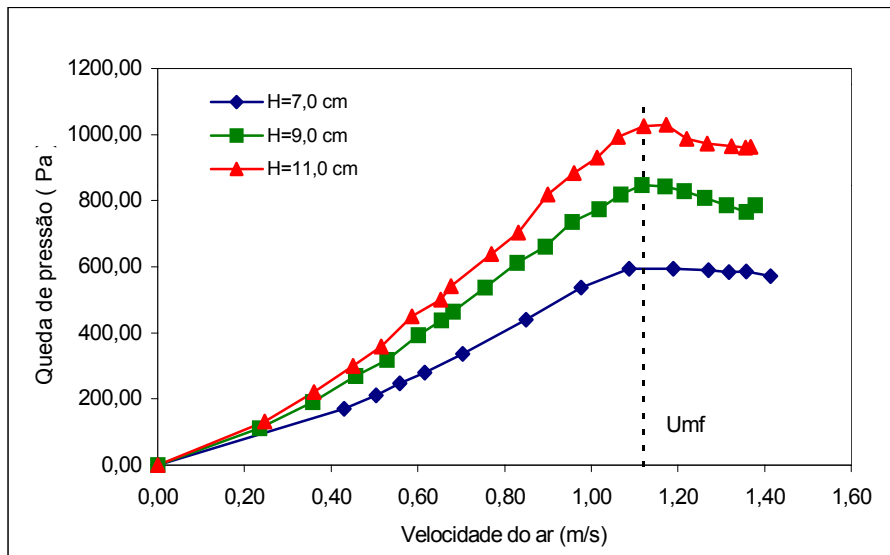


Figura 4.9: Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado parametrizado na altura do leito de partículas. Partículas de alumina $d_p = 3,095 \times 10^{-3}$ m. $\Gamma = 0,0$.

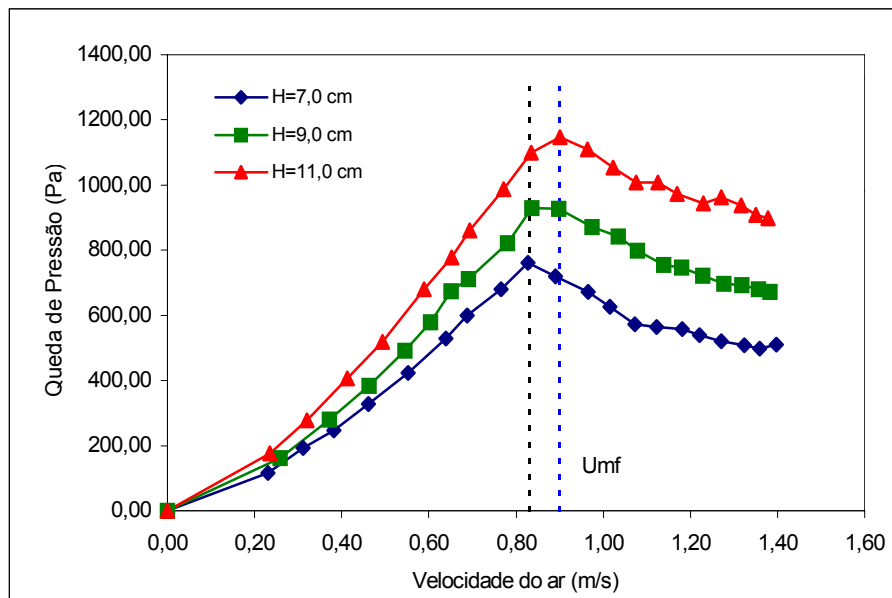


Figura 4.10: Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado parametrizado na altura do leito de partículas. Partículas de sílica-gel $d_p = 2,595 \times 10^{-3}$ m. $\Gamma = 0,0$.

As curvas de desvio padrão para as partículas de alumina e sílica-gel no leito fluidizado estão mostradas nas figuras 4.11 e 4.12, onde observa-se praticamente o mesmo comportamento, para ambos os casos, ou seja, manteve-se um patamar com um crescimento constante do valor do desvio padrão, na região de leito fixo. Quando a velocidade do ar atinge a velocidade de mínima fluidização, observa-se que o desvio padrão começa a aumentar de forma significativa. Este aumento foi mais pronunciado já na região de fluidização bem desenvolvida. Embora haja um aumento significativo do valor do desvio padrão em ambos os casos, cerca de até 5 vezes o valor inicial, as curvas de desvio padrão mantêm o mesmo comportamento, mostrando não haver diferença entre elas em função da altura do leito de partículas, resultado semelhante foi encontrado por Garim (1998).

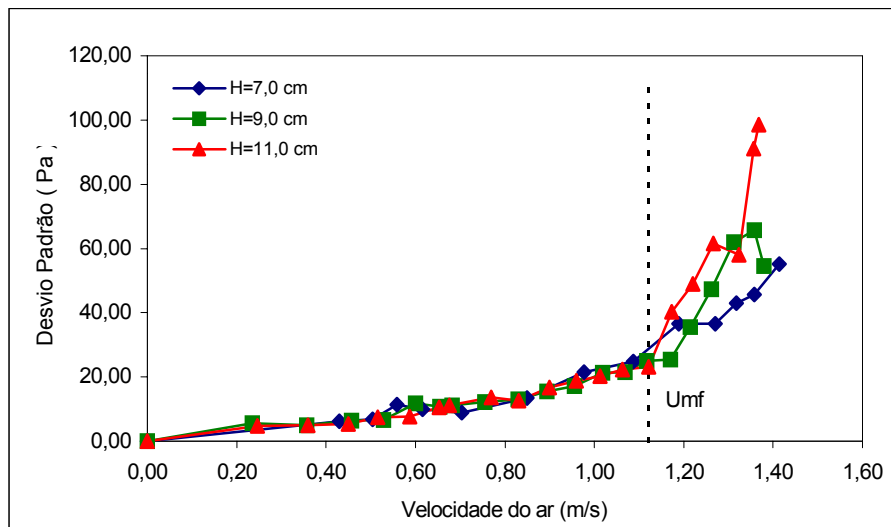


Figura 4.11: Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado parametrizado na altura do leito de partículas de alumina $d_p = 3,0955 \times 10^{-3} \text{ m}$. $\Gamma = 0,0$.

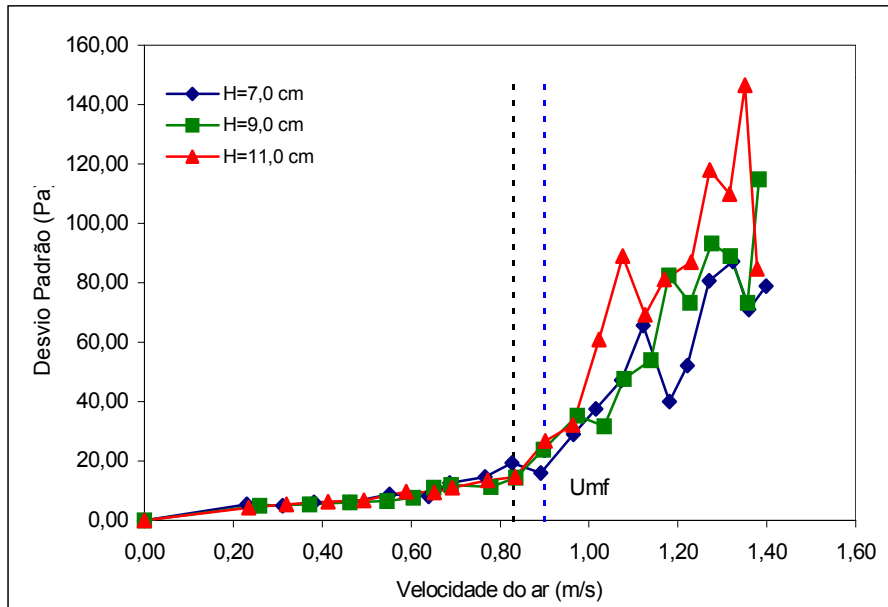


Figura 4.12: Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado parametrizado na altura do leito de partículas de sílica-gel. $d_p = 2,595 \times 10^{-3} \text{ m}$. $\Gamma = 0,0$.

Para avaliar o comportamento fluidodinâmico do leito, quando submetido a vibração, obteve-se as curvas características parametrizadas na altura do leito de partículas, $\Gamma = 1,0$ e $A=2,0 \text{ mm}$. Nas figuras 4.13 e 4.14 observa-se que há um aumento da queda de pressão em função do aumento do leito de partículas, mas os valores de queda de pressão são inferiores aos valores obtidos em relação ao leito fluidizado, devido a imposição da vibração ao sistema, que favorece a percolação de ar através do leito. Nota-se que há um aumento proporcional da queda de pressão em função da velocidade do ar até um valor limite, passagem do estado estático para o fluidizado, após o qual a queda de pressão em ambos os casos permanece praticamente constante para valores crescentes de velocidade do ar para as três alturas avaliadas.

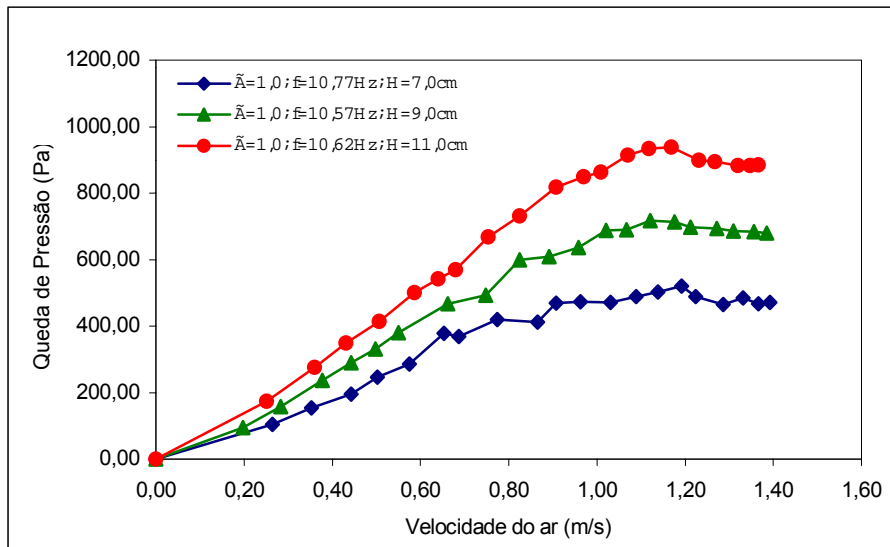


Figura 4.13: Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar no leito vibro-fluidizado parametrizado na altura do leito de partículas de alumina $d_p = 3,095 \times 10^{-3} \text{ m}$; $A = 2,0 \text{ mm}$.

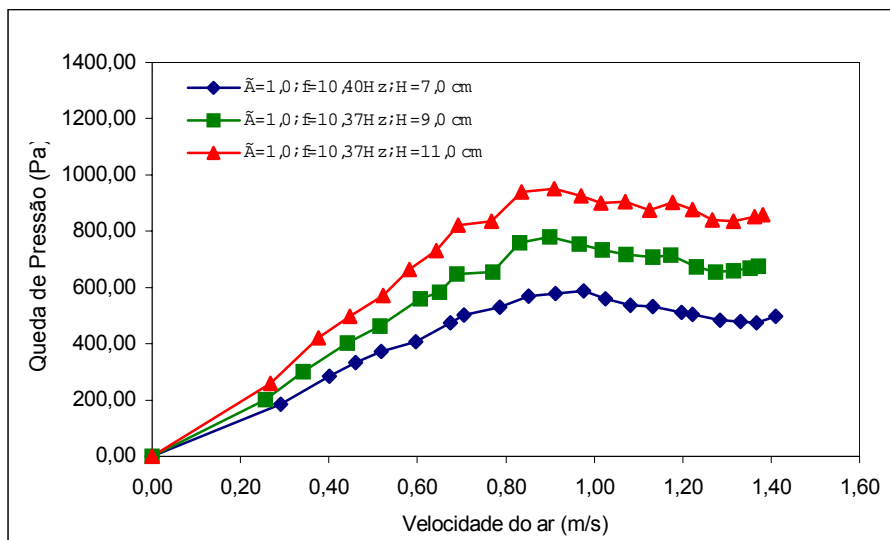


Figura 4.14: Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado parametrizado na altura do leito de partículas de sílica-gel $d_p = 2,595 \times 10^{-3} \text{ m}$. $A = 2,0 \text{ mm}$.

Nas figuras 4.15 e 4.16 são apresentadas as curvas de desvio padrão nas condições operacionais parametrizadas na altura do leito de partículas. Pode-se observar que o desvio

padrão sofre forte influência das condições de vibração imposta ao sistema e da velocidade do ar. Na figura 4.15, o desvio padrão apresentou o mesmo comportamento até uma velocidade de 0,55 m/s, após a qual houve um aumento substancial do desvio padrão, apresentando um perfil oscilatório para as três alturas estudadas, diferenciando do comportamento observado para o leito fluidizado, que não apresentou essa diferença (figura 4.11). Na figura 4.16 os valores de desvio padrão apresentaram quase o mesmo comportamento global observado pelas partículas de alumina, entretanto pequenas mudanças ocorreram na faixa de baixas velocidades do ar, em função da menor densidade e do diâmetro das partículas que dissipam mais a força vibracional imposta ao leito. A partir da velocidade do ar 0,40 m/s pode-se observar um aumento significativo do desvio padrão, que chega a até três vezes o valor obtido nesta velocidade. Após esta velocidade limite o desvio padrão apresentou também um perfil oscilatório para as três alturas avaliadas, mas sujeito a menores variações dos valores de desvio padrão. O comportamento observado foi diferente para o leito na ausência de vibração, (figura 4.12).

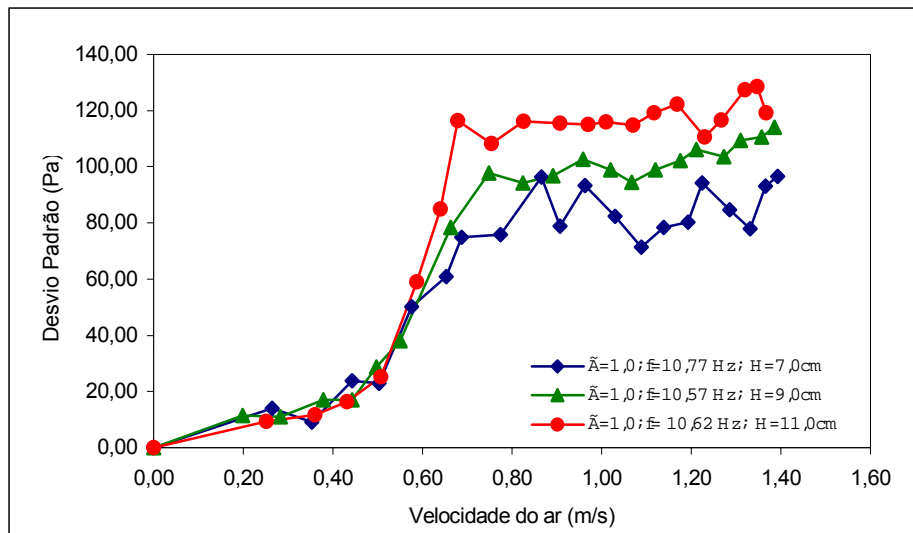


Figura 4.15: Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado parametrizado na altura do leito de partículas de alumina $d_p = 3,095 \times 10^{-3}$ m. $A = 2,0$ mm.

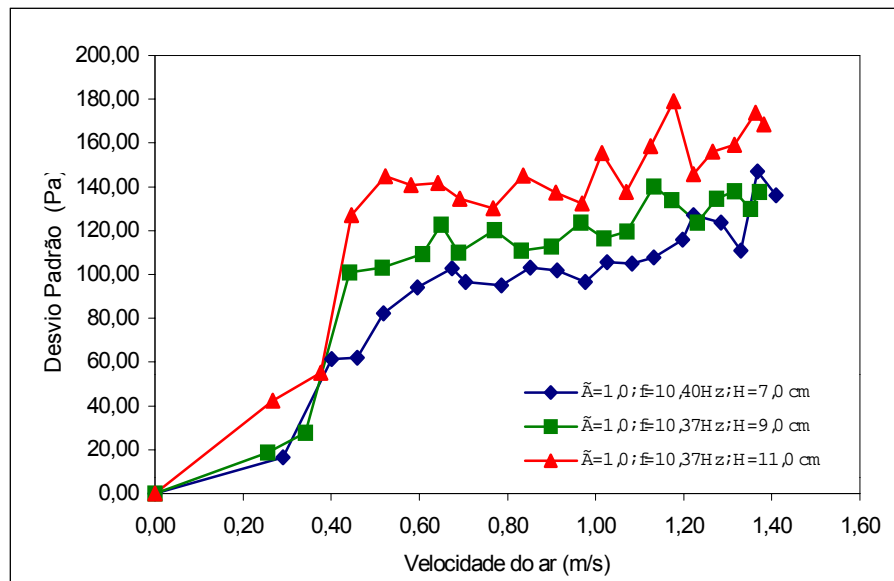


Figura 4.16: Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado parametrizado na altura do leito de partículas de sílica-gel $d_p = 2,595 \times 10^{-3}$ m. $A=2,0$ mm.

4.1.2) Influência da amplitude no comportamento fluidodinâmico do leito

Os efeitos do aumento da amplitude vibracional podem ser observados nas figuras 4.17 e 4.18. As curvas características foram obtidas para uma altura de leito de partículas de 7,0 cm e $\Gamma = 0,5$. Embora nestas condições operacionais, haja uma compactação do leito de partículas em virtude da aceleração gravitacional superar a aceleração vibracional, pode ser observado que há uma redução da queda de pressão, após a fluidização, devido a uma maior expansão do leito de partículas, com o aumento da amplitude vibracional. Na figura 4.17 este comportamento é facilmente observado, tendo também como referencial a curva característica para o leito fluidizado. Para o sistema composto pelas partículas de sílica-gel, figura 4.18, a diminuição da queda de pressão com o aumento da amplitude vibracional também foi verificada, porém com uma pequena variação em relação ao leito fluidizado e também, comparativamente, menor ao sistema composto pelas partículas de alumina.

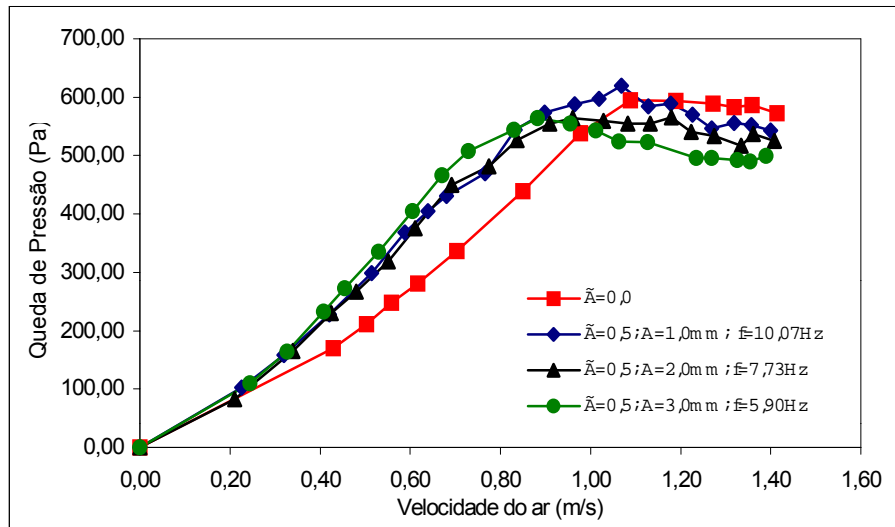


Figura 4.17: Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado parametrizado na amplitude vibracional. Partículas de alumina $d_p = 3,095 \times 10^{-3} \text{m}$. $H=7,0 \text{ cm}$.

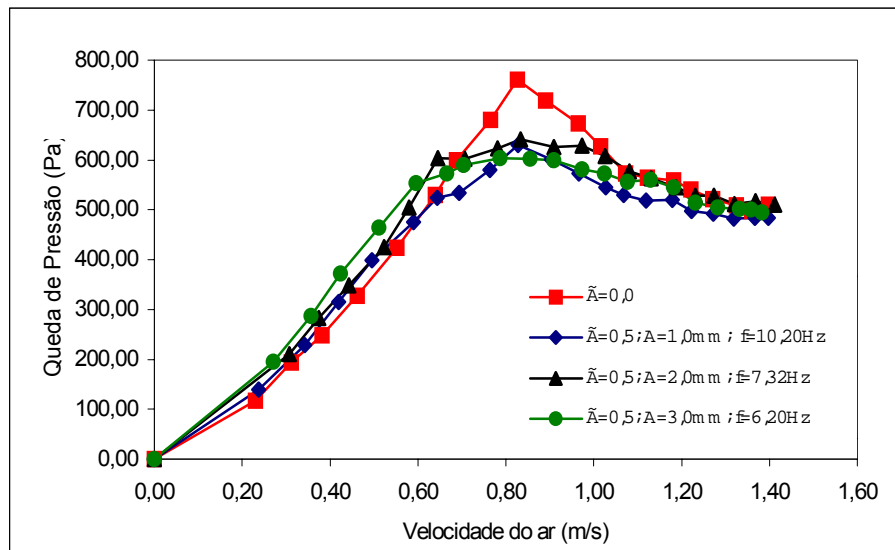


Figura 4.18: Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado parametrizado na amplitude vibracional. Partículas de sílica-gel $d_p = 2,595 \times 10^{-3} \text{m}$. $H=7,0 \text{ cm}$.

A redução da queda de pressão com aumento da amplitude vibracional foi observado por Erdész e Ormós (1984), os quais utilizaram partículas inertes de areia de diversos diâmetros, operando com amplitudes vibracionais variando de 0,6 a $1,85 \times 10^{-3}$ m.

A amplitude vibracional tem pouca influência no comportamento das curvas de desvio padrão, como pode ser observado nas figuras 4.19 e 4.20. Em ambos os sistemas as curvas de desvio padrão apresentaram comportamento praticamente idêntico até um certo valor limite de velocidade do ar, inclusive para o leito fluidizado. Nota-se que quando o ar atinge a velocidade de 0,62 m/s e 0,50 m/s para os sistemas compostos pelas partículas de alumina e sílica-gel, respectivamente, região onde começa a movimentação das partículas, uma em relação às outras, os valores obtidos do desvio padrão aumentam significativamente, para valores crescentes de velocidade do ar, chegando a até oito vezes o valor obtido nestas velocidades, para os sistemas sujeitos à vibração em função da maior facilidade do ar em percolar pelo meio, porém, apresentando o mesmo comportamento para as três amplitudes vibracionais avaliadas.

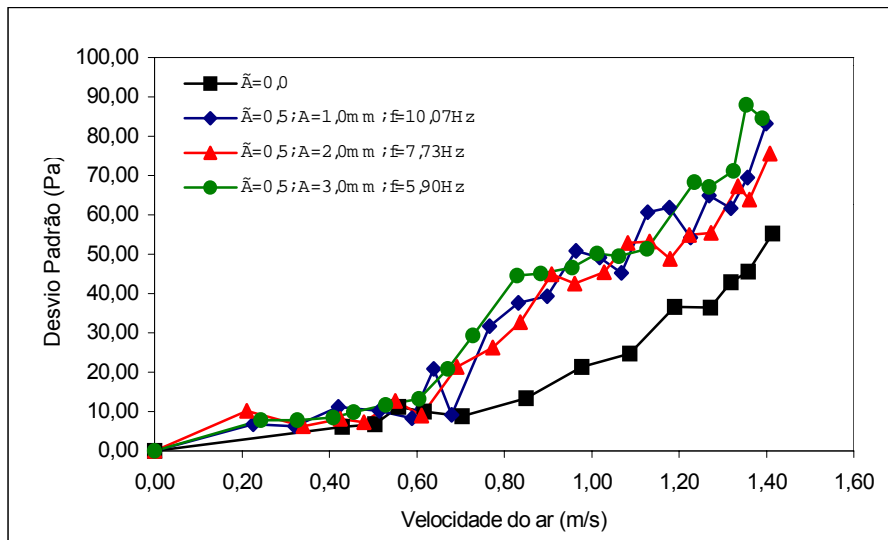


Figura 4.19: Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado parametrizado na amplitude vibracional. Partículas de alumina $d_p = 3,095 \times 10^{-3}$ m. $H=7,0$ cm.

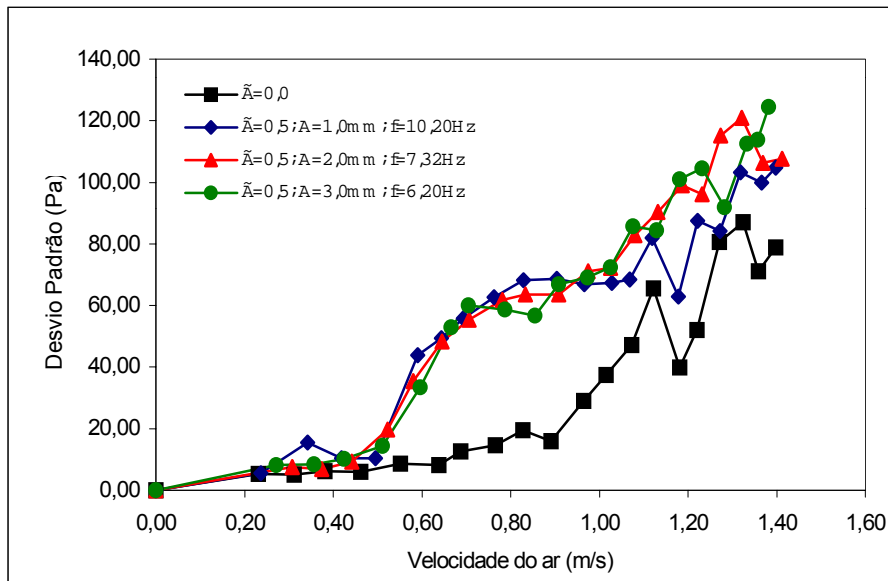


Figura 4.20: Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito vibro-fluidizado parametrizado na amplitude vibracional. Partículas de sílica-gel $d_p = 2,595 \times 10^{-3}$ m. $H=7,0$ cm.

4.1.3) Influência do diâmetro das partículas no comportamento fluidodinâmico do leito

Os testes experimentais, para avaliar a influência do diâmetro das partículas no comportamento fluidodinâmico do leito, foram realizados somente com as partículas de sílica-gel, $d_p = 2,595 \times 10^{-3}$ e $3,095 \times 10^{-3}$ m. Os resultados experimentais obtidos podem ser verificados nas curvas características e nas curvas de desvio padrão, figuras 4.21 e 4.22. Na figura 4.21, observa-se que o diâmetro das partículas tem influência sobre o comportamento dinâmico do leito na região que se estende da região de leito fixo até a região de máxima pressão no leito, sendo que, na região de fluidização completamente desenvolvida a sua influência é relativamente pequena. Isto pode ser verificado tanto para o leito fluidizado, como para o leito sujeito à ação da energia vibracional, neste caso $\Gamma = 1,0$. As partículas de maior diâmetro (maior massa de

partículas no leito para o mesmo volume) deslocaram a curva característica para a direita, implicando numa maior velocidade de mínima fluidização (de 0,83 para 0,90 m/s) e de velocidade mínima de vibro fluidização (0,85 para 0,93 m/s), aproximadamente. Observando-se a figura 4.21, pode-se perceber uma redução da queda de pressão no leito em virtude da imposição ao mesmo da energia vibracional (auxilia na expansão do leito), resultado típico previsto pela literatura, Camargo (1998).

A análise das curvas de desvio padrão, figura 4.22, mostra que para o leito fluidizado, o desvio padrão sofre pouca influência do diâmetro das partículas na região de leito fixo, resultado de uma pequena variação da queda de pressão neste estágio. Após ser atingida a fluidização completamente desenvolvida, os valores de desvio padrão para as partículas de maior diâmetro foram inferiores às partículas menores, devido ao fato de que com o aumento da dimensão das mesmas, menor é a movimentação relativa dentro do leito. As oscilações observadas no desvio padrão para altos valores de velocidade do ar são em decorrência do aparecimento de bolhas de ar, sendo que, quanto menor o diâmetro das partículas mais intensa será a formação das mesmas. O mesmo comportamento foi observado por Daleffe (2002), utilizando partículas inertes de vidro de diferentes diâmetros.

Quando o leito está sujeito à vibração, a dinâmica do leito é alterada de forma que os valores obtidos para o desvio padrão são semelhantes até uma velocidade de 0,37 m/s. Após esta velocidade os valores de desvio padrão aumentam bruscamente em virtude do aumento da velocidade do ar, ocasionando uma movimentação relativa das partículas muito intensa e do aparecimento de bolhas. Para maiores valores de diâmetro de partículas obteve-se menores valores de desvio padrão, resultado semelhante ao leito fluidizado, sendo que as maiores oscilações observadas se deram a altas velocidades do ar, como mostra a figura 4.22.

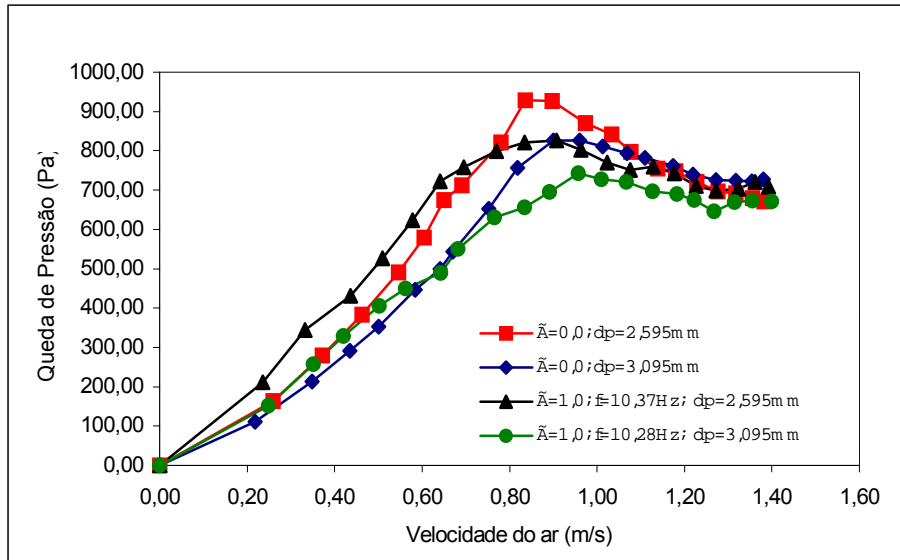


Figura 4.21: Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado e vibro-fluidizado parametrizado no diâmetro das partículas de sílica-gel. $H=9,0\text{ cm}$ – $A=2,0\text{ mm}$.

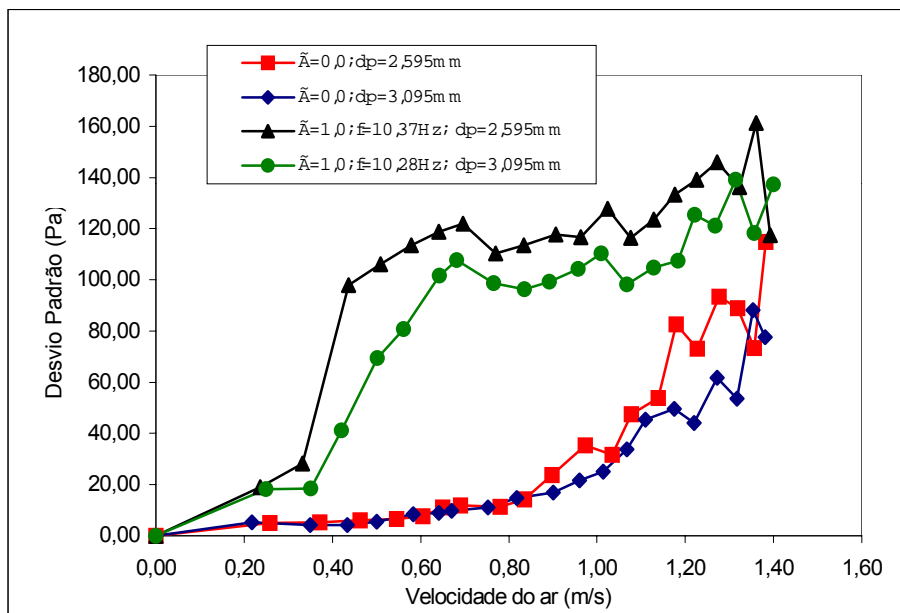


Figura 4.22: Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado e vibro-fluidizado parametrizado no diâmetro das partículas de sílica-gel. $H=9,0\text{ cm}$ – $A=2,0\text{ mm}$.

4.1.4) Influência do adimensional de vibração na fluidodinâmica do leito

Nesta análise verificou-se a influência dos adimensionais de vibração para uma mesma altura de leito. Para o sistema composto pelas partículas de alumina e de sílica-gel utilizou-se $H = 0,07$ m, $A = 1,0 \times 10^{-3}$ e $2,0 \times 10^{-3}$ m e $d_p = 3,095 \times 10^{-3}$ e $2,595 \times 10^{-3}$ m, respectivamente. As curvas obtidas apresentam comportamento semelhante às da literatura, Strumillo e Pakowski (1980), Garim (1998), Camargo (1998) e Daleffe (2002), onde observa-se a influência dos parâmetros vibracionais no comportamento fluidodinâmico do leito.

Em ambos os casos, figuras 4.23 e 4.24, pode ser verificado que para baixas velocidades do ar, na região de leito fixo, a curva característica para o leito fluidizado apresenta uma queda de pressão inferior em relação ao leito vibrado. Isto pode ser explicado pelo fato de que a vibração causa a compactação do leito causando um aumento na queda de pressão, e em especial no caso de $\Gamma = 0,5$, onde a energia gravitacional é superior à energia vibracional imposta ao leito. Observa-se ainda que, com o aumento da velocidade do ar, no leito fluidizado, há um aumento da queda de pressão no leito, devido ao maior esforço do sistema em manter as partículas suspensas. Para o leito sujeito à vibração há uma redução da queda de pressão, pois em função da energia vibracional imposta ao mesmo, o leito se expande, facilitando a percolação de ar. Na figura 4.24 observa-se que o efeito da vibração foi menos pronunciado em relação ao sistema composto pelas partículas de sílica-gel. Isto se deve ao fato de que partículas com menor diâmetro apresentam um maior efeito coesivo e dissipam mais facilmente a energia vibracional adicionada ao leito. Nota-se ainda que a curva característica para o leito fluidizado, apresenta um comportamento semelhante ao de um leito de jorro, indicando uma má fluidização do sistema. Com a adição da energia vibracional ao leito houve uma melhora significativa das condições de fluidização do leito, em decorrência de uma otimização na formação das bolhas, na porosidade e na permeabilidade do meio.

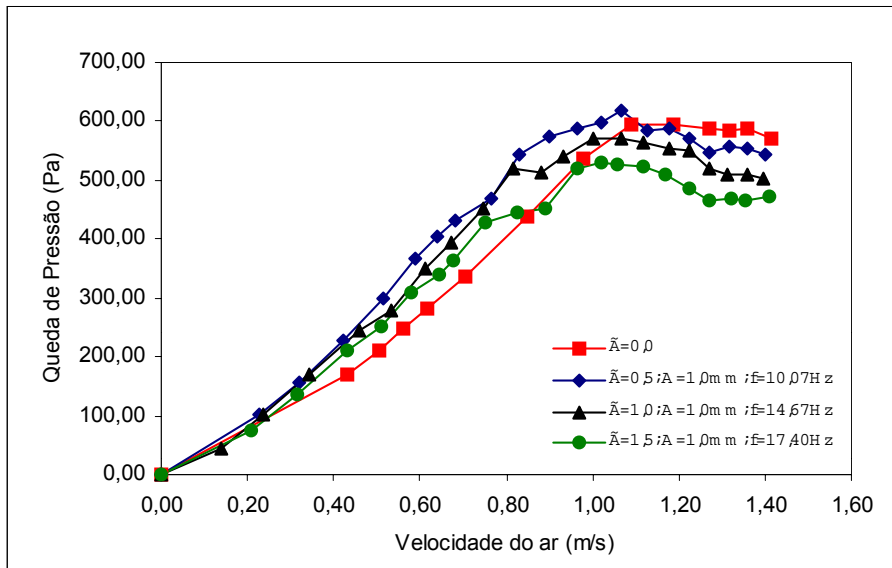


Figura 4.23: Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o leito fluidizado e vibro-fluidizado parametrizado no adimensional de vibração. Partículas de alumina. $d_p = 3,095$ mm. $H=7,0$ cm.

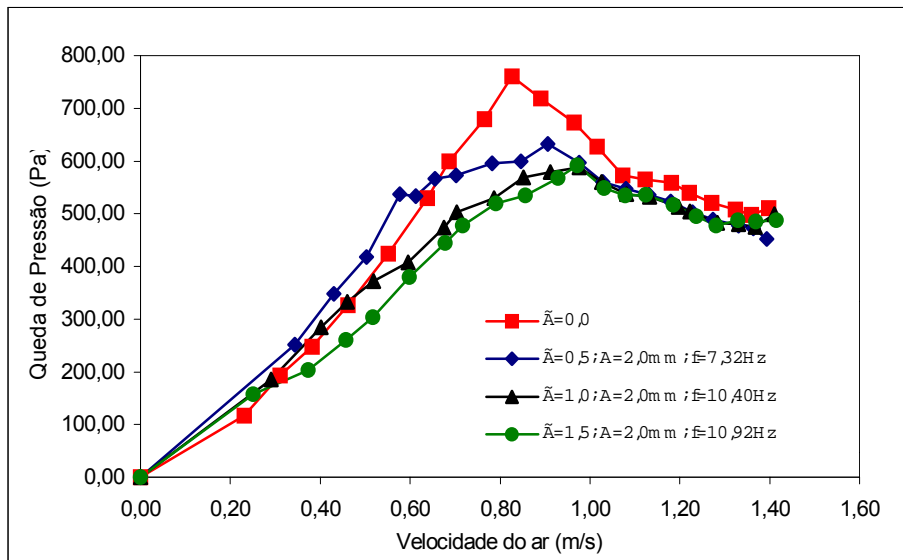


Figura 4.24: Queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para os leitos fluidizado e vibro-fluidizado parametrizado no adimensional de vibração. Partículas de sílica-gel. $d_p = 2,595$ mm. $H= 7,0$ cm.

As figuras 4.25 e 4.26 mostram os resultados obtidos para as curvas de desvio padrão em função do adimensional de vibração, e em ambos os casos, mostram a influência do adimensional de vibração no comportamento do desvio padrão.

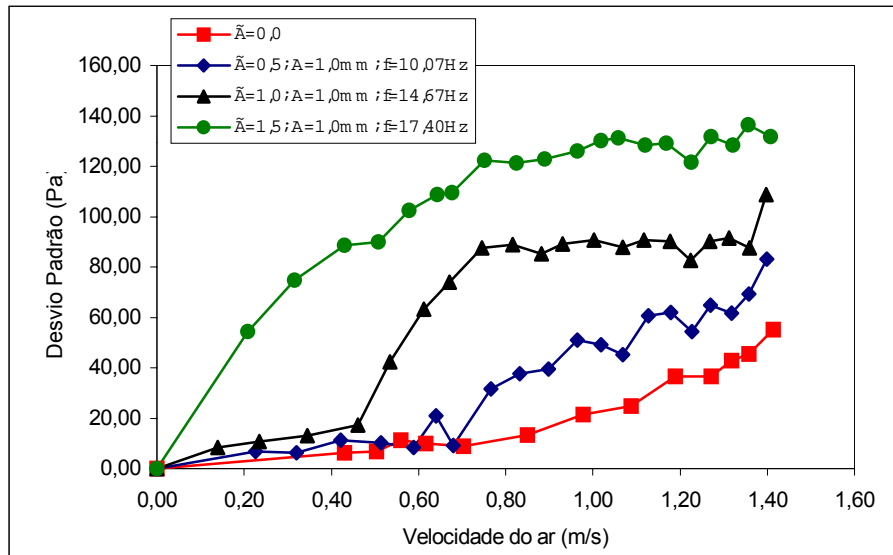


Figura 4.25: Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para os leitos fluidizado e vibro-fluidizado parametrizado no adimensional de vibração. Partículas de alumina. $d_p = 3,095$ mm. $H=7,0$ cm.

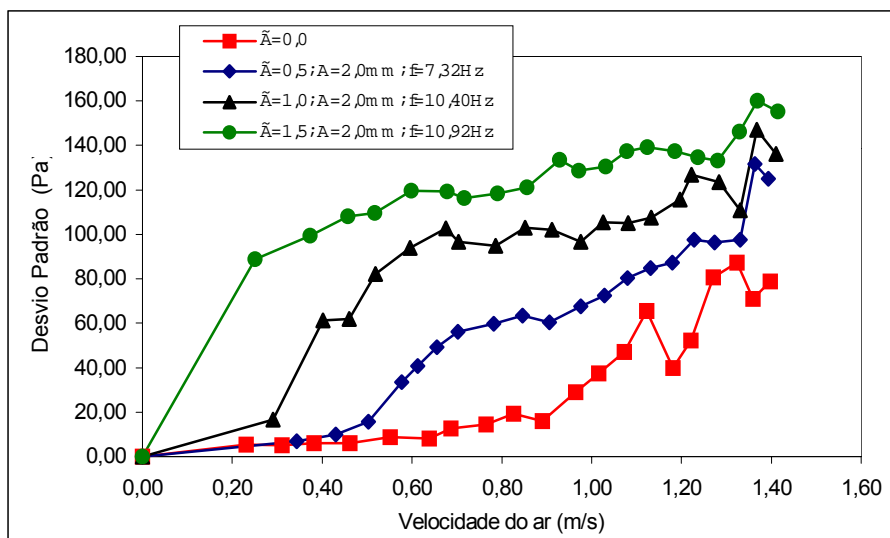


Figura 4.26: Desvio padrão em função da velocidade superficial do ar para os leitos fluidizado e vibro-fluidizado parametrizado no adimensional de vibração. Partículas de sílica-gel. $d_p = 2,595$ mm. $H=7,0$ cm.

Para $\Gamma = 0,5$, o comportamento do desvio padrão é semelhante ao do leito fluidizado, embora esteja havendo uma compactação do leito sob vibração, até uma velocidade de 0,6 m/s para as partículas de alumina, figura 4.25, e 0,43 m/s para as partículas de sílica-gel, figura 4.26; após estas velocidades há um aumento gradativo do desvio padrão com o aumento da velocidade do ar e da própria imposição de vibração ao leito, fazendo com que haja alterações nas características fluidodinâmicas do leito, (mistura mais intensa). Para um valor de $\Gamma = 1,0$, nota-se que na figura 4.25, para baixas velocidades do ar, o desvio padrão apresenta comportamento semelhante ao do leito fluidizado até uma velocidade de 0,44 m/s, indicando que a vibração não teve uma forte influência neste caso, em função do maior diâmetro das partículas; aumentando de forma brusca até uma velocidade de 0,73 m/s, onde a partir deste ponto atinge um patamar praticamente constante, indicando que o sistema está menos susceptível à influência da energia vibracional já que o ar mantém o leito suspenso.

Na figura 4.26, para $\Gamma = 0,5$, há um aumento significativo do desvio padrão até uma velocidade de 0,58 m/s, indicando uma forte influência da vibração neste sistema a baixas velocidades do ar. Para velocidades de ar superiores a este valor, o desvio padrão apresenta um crescimento mais moderado até a velocidade do ar de 1,20 m/s, onde tem início um comportamento oscilatório em virtude da intensa movimentação das partículas, com pouca influência da energia vibracional. Análise semelhante pode ser efetuada quando o valor do adimensional de vibração é igual a 1,0 e 1,5. Em ambos os casos, figura 4.25 e 4.26, observa-se que para baixas velocidades do ar há uma forte influência da vibração nos valores de desvio padrão, pois os mesmos aumentam de forma significativa até a velocidade de 0,73 m/s para o sistema com as partículas de alumina e 0,59 m/s para o sistema com as partículas de sílica-gel. Após estas velocidades limites, os valores de desvio padrão mantiveram-se praticamente constantes em função da menor influência do adimensional de vibração. Esta menor influência

pode ser explicada pelo desprendimento das partículas do fundo do leito atenuando o efeito da vibração. Resultados semelhantes foram encontrados por Garim (1998), Camargo e Freire (2001) e Daleffe (2002).

4.2) Isotermas de equilíbrio

O método utilizado para a determinação experimental das isotermas de equilíbrio foi o método estático, com o uso de soluções salinas saturadas.

O período de tempo necessário para que as partículas atingissem o equilíbrio, em condições termodinâmicas constantes, foi de 16 a 22 dias para as partículas de alumina e de 16 a 28 dias para as partículas de sílica-gel. As pesagens das amostras foram feitas em intervalos de dois dias. Concluiu-se que o equilíbrio foi atingido quando a pesagem da massa das amostras apresentou três resultados semelhantes.

De forma a obter uma equação que pudesse representar o comportamento dos dados de equilíbrio para as partículas de alumina e sílica-gel, adotou-se um procedimento estatístico de discriminação de equações mais utilizadas na literatura para representar o comportamento higroscópico das partículas.

A obtenção dos parâmetros das equações de equilíbrio foi feita com o auxílio do “software” STATISTICA 5.5, através de estimação não linear por mínimos quadrados, pelos métodos Simplex e Quasi-Newton, utilizando como conjunto de dados as 63 observações experimentais para cada sistema de partículas. O critério adotado para a determinação do melhor ajuste foi baseado nos coeficientes de correlação, R^2 , no erro médio, SE, na razão F, e na análise dos gráficos de distribuição de frequência de resíduos (histograma) e distribuição residual.

A tabela 4.1 apresenta os resultados experimentais obtidos para a umidade de equilíbrio em função das três temperaturas avaliadas (tréplicas e os desvios padrões).

Tabela 4.1: Umidade de equilíbrio das partículas de alumina e sílica-gel e o respectivo desvio padrão das réplicas

Umidade de Equilíbrio - kg água/kg sólido seco x 100						
Temperatura (°C)						
	30	30	45	45	60	60
Solução Salina	Alumina	Sílica	Alumina	Sílica	Alumina	Sílica
LiCl	4,01	4,71	3,96	5,01	3,36	5,79
	3,53	5,38	3,65	6,14	2,91	5,75
	3,79	4,96	3,76	4,52	2,92	5,18
Desvio Padrão	0,24	0,34	0,16	0,84	0,25	0,34
C ₂ H ₃ O ₂ K	5,73	9,43	5,58	9,24	3,66	7,44
	5,22	10,09	5,51	8,74	3,63	7,24
	5,38	10,29	3,59	8,03	3,63	7,33
Desvio Padrão	0,26	0,44	1,13	0,60	0,02	0,10
MgCl ₂	7,37	15,79	7,68	13,32	6,42	11,81
	7,44	16,09	8,00	13,14	5,64	11,78
	7,29	15,56	7,69	13,44	5,57	11,78
Desvio Padrão	0,08	0,27	0,18	0,15	0,47	0,02
K ₂ CO ₃	12,28	25,62	11,08	25,35	8,23	19,46
	12,01	26,17	11,13	24,93	8,38	18,74
	11,87	27,15	10,85	25,48	8,44	18,19
Desvio Padrão	0,21	0,78	0,15	0,28	0,11	0,64
NaNO ₂	18,21	28,19	17,61	27,52	14,97	26,98
	18,19	28,17	17,19	29,00	14,96	28,51
	16,64	26,68	17,49	27,87	14,84	28,77
Desvio Padrão	0,90	0,87	0,22	0,78	0,07	0,97
NaCl	20,40	31,53	20,53	30,97	19,22	30,87
	20,09	30,99	20,62	31,24	19,39	31,06
	20,13	31,34	20,92	31,43	19,65	30,68
Desvio Padrão	0,17	0,27	0,20	0,23	0,22	0,19
KCl	22,56	31,97	22,49	31,48	21,57	31,86
	22,27	32,93	21,85	31,84	20,61	31,68
	22,20	32,95	22,02	31,11	20,95	31,65
Desvio Padrão	0,19	0,56	0,33	0,36	0,49	0,12

As tabelas 4.2 e 4.3 apresentam os resultados obtidos da estimação por mínimos quadrados dos parâmetros das equações; onde Y_{eq} está em base seca, T em °C e UR em decimal; com os respectivos valores de R^2 , erro médio (SE) e razão F.

Tabela 4.2: Resultados obtidos via estimação não linear para as equações de equilíbrio para as partículas de alumina

EQUAÇÃO	PARÂMETROS	VALOR	R ²	ERRO MÉDIO (SE)	RAZÃO F
Henderson Eq.(2.20)	a	0,654	0,922	0,22	374,43
	b	1,787			
Henderson Thompson Eq.(2.21)	a	0,004	0,986	0,07	1099,81
	b	1,393			
	c	3598,097			
Chung-Pfost Eq.(2.22)	a	2488,056	0,985	0,07	1064,80
	b	11,612			
	c	780,196			
Chen-Clayton Eq.(2.23)	a	10,414	0,987	0,05	778,61
	b	-0,329			
	c	24,840			
	d	-0,203			
Halsey Modificada Eq.(2.24)	a	0,004	0,957	0,11	354,53
	b	1,537			
	c	-3,909			
Sabbah Eq. (2.25)	a	0,293	0,991	0,05	1680,29
	b	1,105			
	c	0,015			

Tabela 4.3: Resultados obtidos via estimação não linear para as equações de equilíbrio para as partículas de sílica-gel

EQUAÇÃO	PARÂMETROS	VALOR	R ²	ERRO MÉDIO (SE)	RAZÃO F
Henderson Eq.(2.20)	a	0,454	0,897	0,36	298,76
	b	2,171			
Henderson Thompson Eq.(2.21)	a	0,00441	0,953	0,17	348,82
	b	1,772			
	c	2366,44			
Chung-Pfost Eq.(2.22)	a	1539965	0,952	0,18	340,32
	b	8,149			
	c	395725			
Chen-Clayton Eq.(2.23)	a	21,996	0,955	0,14	239,09
	b	-0,4593			
	c	23,365			
	d	-0,281			
Halsey Modificada Eq.(2.24)	a	0,0045	0,899	0,25	149,77
	b	1,910			
	c	-3,688			
Sabbah Eq. (2.25)	a	0,402	0,973	0,13	621,88
	b	0,843			
	c	-0,002812			

De acordo com os critérios adotados para a escolha da melhor equação que represente os dados experimentais, foi feita uma análise global das variáveis envolvidas. Pela análise dos gráficos de distribuição de frequência de resíduos e distribuição residual, juntamente com os valores de R^2 , erro médio (SE) e razão F, observa-se que a equação de Sabbah, eq. 2.25, para as partículas de alumina, apresenta uma melhor distribuição aleatória de resíduos, embora se verifique pouca diferença entre os demais valores obtidos. Apesar da equação de Sabbah, eq. 2.25, não ter apresentado uma boa distribuição de frequência em relação à equação de Chen-Clayton, eq. 2.23, a mesma foi escolhida após a análise global dos critérios adotados. De forma análoga, a equação de Sabbah, eq. 2.25, foi a escolhida para representar os dados experimentais das partículas de sílica-gel, sendo que as análises estatísticas efetuadas foram as mesmas descritas anteriormente. Os dados referentes aos ensaios experimentais e à distribuição de frequência de resíduos e distribuição residual encontram-se nos Apêndices B e C.

As figuras 4.27 a 4.29 apresentam as isotermas de equilíbrio experimentais e as previstas pela equação de Sabbah, eq. 2.25.

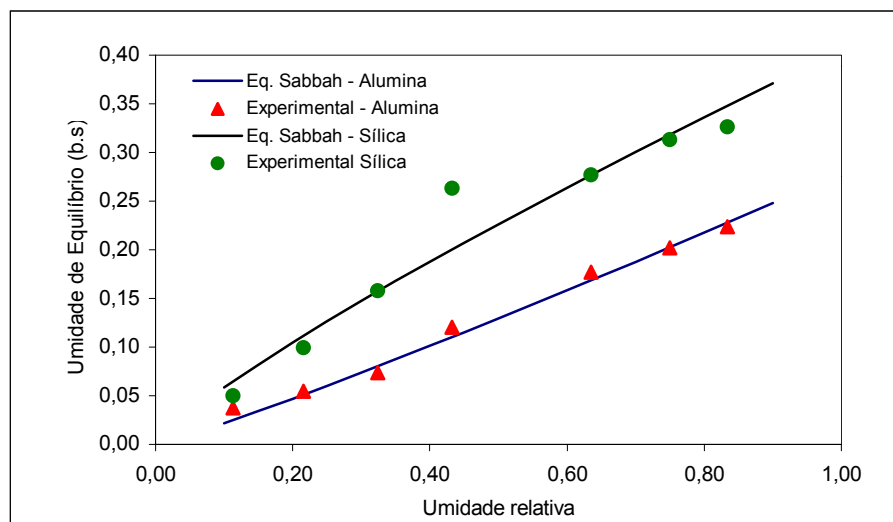


Figura 4.27: Umidade de equilíbrio em função da umidade relativa para as partículas de alumina e sílica-gel.
 $T = 30^{\circ}\text{C}$.

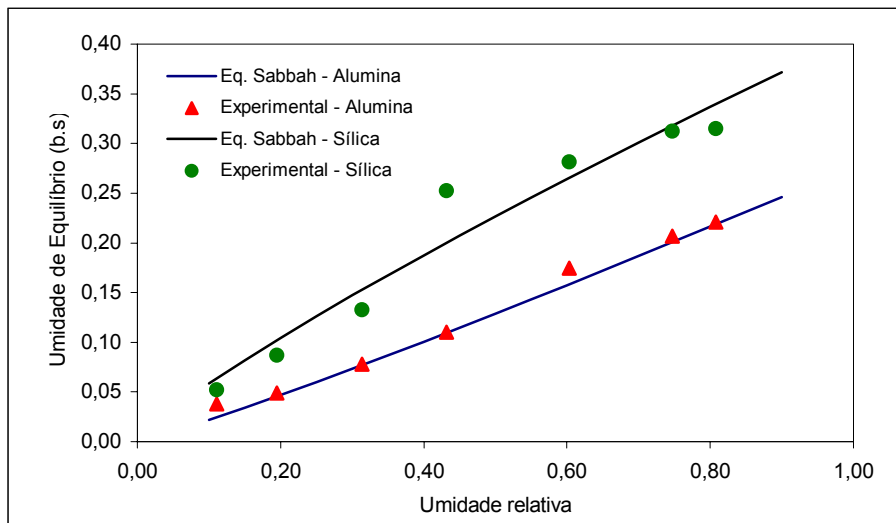


Figura 4.28: Umidade de equilíbrio em função da umidade relativa para as partículas de alumina e sílica-gel - $T = 45^{\circ}\text{C}$.

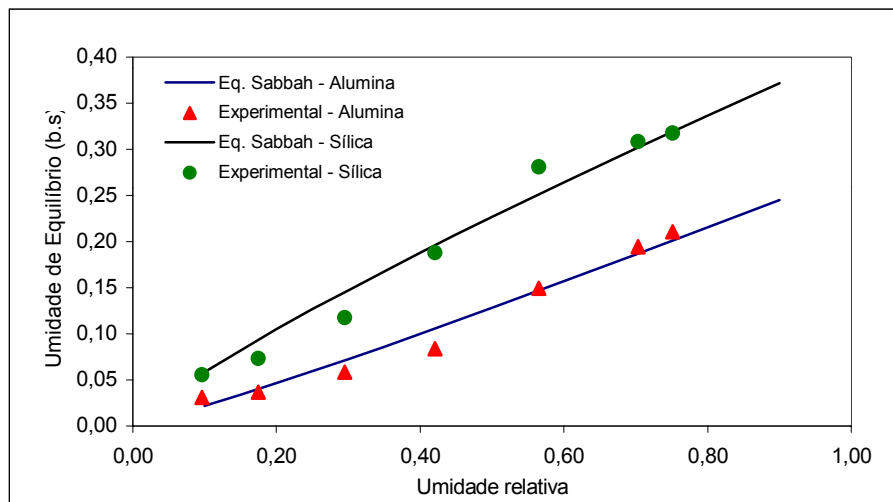


Figura 4.29: Umidade de equilíbrio em função da umidade relativa para as partículas de alumina e sílica-gel - $T = 60^{\circ}\text{C}$.

Observa-se que para a solução salina de K_2CO_3 , umidade relativa em torno de 0,42, os valores obtidos para a isoterma de equilíbrio das partículas de sílica-gel, apresentam um maior desvio e que o mesmo diminui com o aumento da temperatura, conforme mostram as figuras 4.27 a 4.29.

Os valores teóricos obtidos pela equação de Sabbah, eq. 2.25, para as partículas de alumina, apresentam uma boa correlação com os dados experimentais, figuras 4.27 a 4.29, nas três temperaturas avaliadas.

Para as partículas de sílica-gel, os valores teóricos obtidos pela equação de Sabbah apresentam desvios em relação aos dados experimentais, o que já era esperado, pois obteve-se um coeficiente de correlação, $R^2 = 0,973$, para um erro médio, $SE = 0,13$. Para $T = 45^\circ C$, um desvio maior em relação ao experimental pode ser observado, figura 4.28. Estes desvios podem ter origem na interação das estufas com o meio externo, pois as mesmas não são completamente isoladas ou por algum erro experimental, que influenciou de forma mais significativa as partículas de sílica-gel, visto que as corridas se deram de forma simultânea e na mesma estufa.

4.3) Cinética de secagem

O estudo cinético das partículas de alumina e sílica-gel foi efetuado em leito fixo com camada fina, e os experimentos de secagem foram realizados para três diferentes níveis de temperatura: 60, 80 e 100 °C e cinco velocidades do ar de secagem 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5 m/s.

A determinação da cinética de secagem, em ambos os casos, apresentou uma peculiaridade, pois a secagem das partículas, tanto em função da temperatura como da

velocidade do ar, foi extremamente rápida, cerca de 10min. Este comportamento determinou alguns cuidados especiais, pois as medidas foram efetuadas em intervalos de 1,0 mim.

Com os dados experimentais obtidos de umidade e tempo ao longo de cada corrida experimental foram construídas as curvas de umidade adimensional (YR) em função do tempo de secagem. O valor da umidade de equilíbrio (Y_{eq}) utilizada para o cálculo da umidade adimensional foi obtido por intermédio da equação de Sabbah, eq. 2.25, para as partículas de alumina e sílica-gel, sendo que, os respectivos valores dos parâmetros se encontram nas tabelas 4.2 e 4.3. O adimensional de umidade foi calculado de acordo com a seguinte equação:

$$YR = \frac{Y - Y_{eq}}{Y_0 - Y_{eq}} \quad (4.1)$$

onde: Y é a umidade do sólido em base seca e Y_0 a umidade inicial do sólido em base seca.

Os dados relativos às curvas de secagem para as partículas de alumina e sílica gel se encontram no Apêndice D.

Os dados experimentais obtidos mostraram-se reproduzíveis, face aos pequenos desvios encontrados nos valores da umidade adimensional (YR) das réplicas efetuadas, mostrando que os desvios encontrados estão dentro da faixa de erro experimental e comprovam a validade da metodologia experimental utilizada. Nas figuras 4.30 e 4.31, e 4.32 e 4.33 estão representadas as curvas de secagem para as partículas de alumina e sílica-gel, respectivamente, em diferentes condições operacionais, mostrando a boa reprodutibilidade dos dados experimentais.

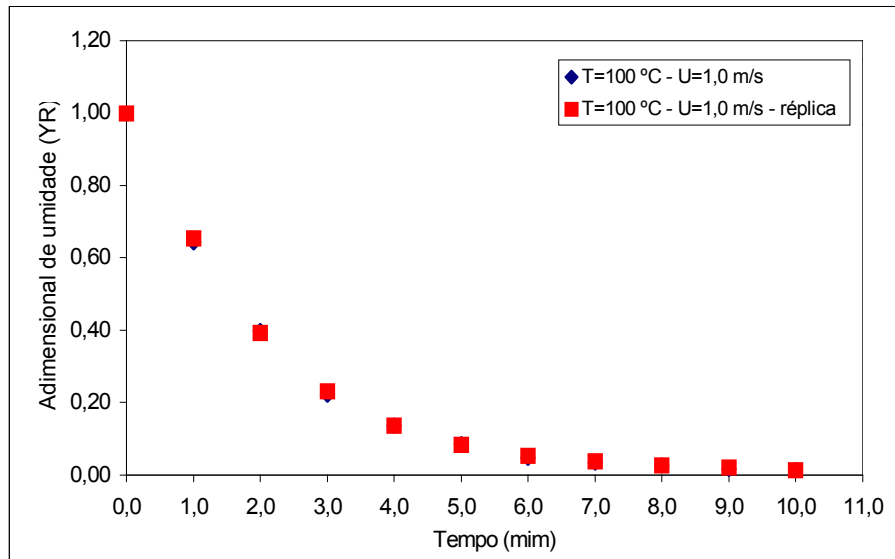


Figura 4.30: Umidade adimensional em função do tempo para as partículas de alumina. T = 100°C e U = 1,0 m/s.

Na figura 4.31 pôde ser observado um maior desvio, entre as réplicas, mas o mesmo encontra-se dentro da faixa de erro experimental.

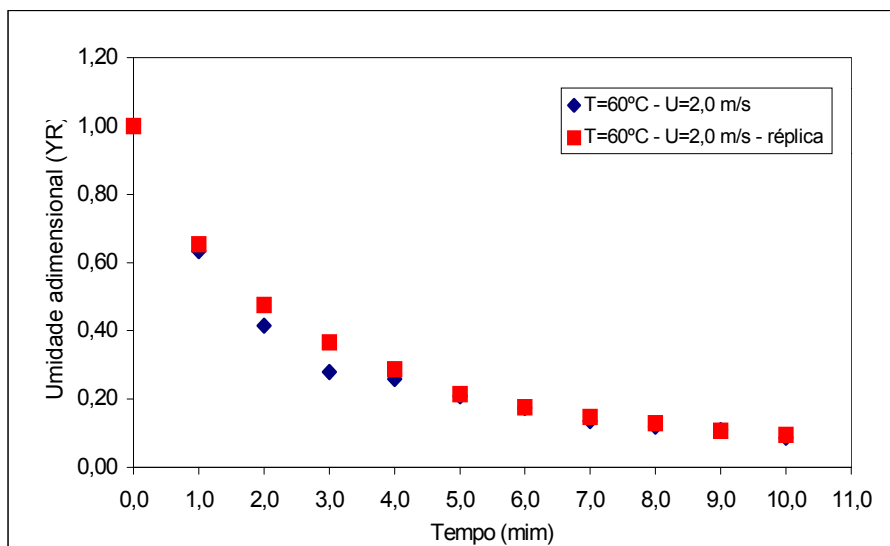


Figura 4.31: Umidade adimensional em função do tempo para as partículas de alumina. T = 60°C e U = 2,0 m/s.

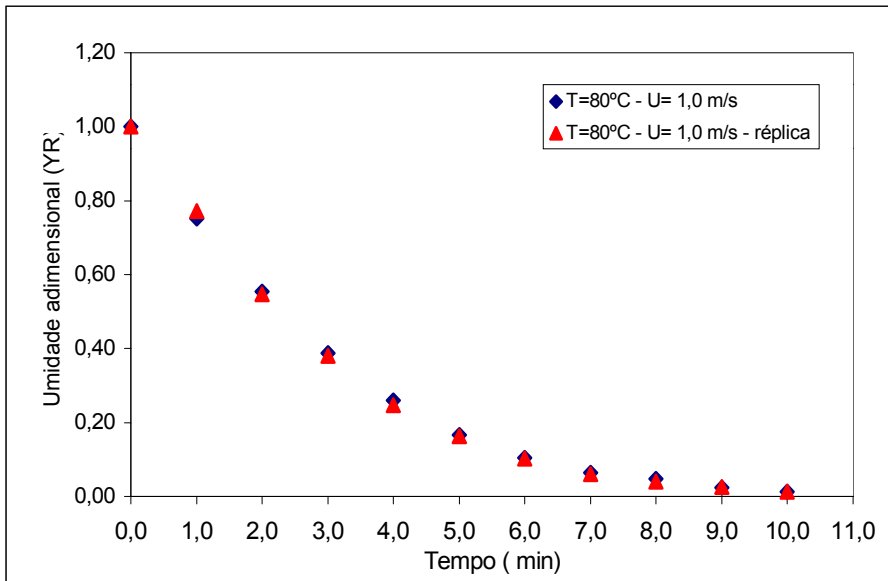


Figura 4.32: Umidade adimensional em função do tempo para as partículas de sílica-gel. $T = 80^{\circ}\text{C}$ e $U = 1,0 \text{ m/s}$.

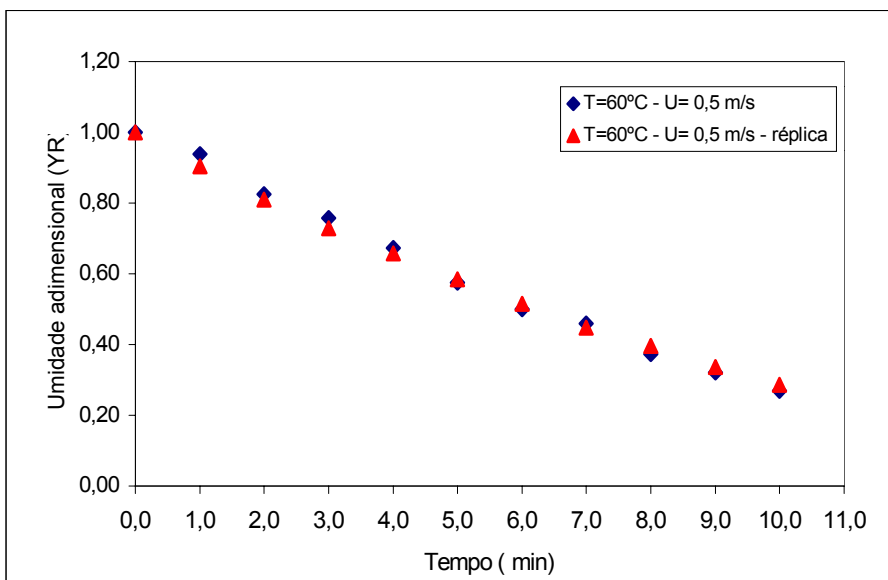


Figura 4.33: Umidade adimensional em função do tempo para as partículas de sílica-gel. $T = 60^{\circ}\text{C}$ e $U = 0,5 \text{ m/s}$.

Nas figuras 4.34 e 4.35 estão apresentadas as curvas de secagem em função da velocidade do ar, mantida a temperatura constante. Observa-se que, em ambos os casos, o efeito convectivo é bastante pronunciado até as velocidades de 1,5 m/s, tornando-se menos perceptível nas velocidades de 2,0 e 2,5 m/s, devido à migração de umidade não uniforme do interior das partículas. Mas, o efeito convectivo é menos pronunciado já a partir do intervalo de tempo entre 3 a 4 minutos tanto para as partículas de alumina, quanto para as partículas de sílica-gel. Observa-se, também, que a velocidade do ar de secagem exerce uma forte influência na cinética de secagem de ambas as partículas, mas diminui à medida que a velocidade do ar aumenta, indicando que o efeito difusivo passa a controlar o processo de secagem, ou seja, os mecanismos internos passam a controlar a transferência de massa após 3 a 4 min de secagem e para velocidade de ar entre 2,0 e 2,5 m/s. O movimento interno de umidade do material é função de sua temperatura, conteúdo de umidade e da área de exposição do material sólido.

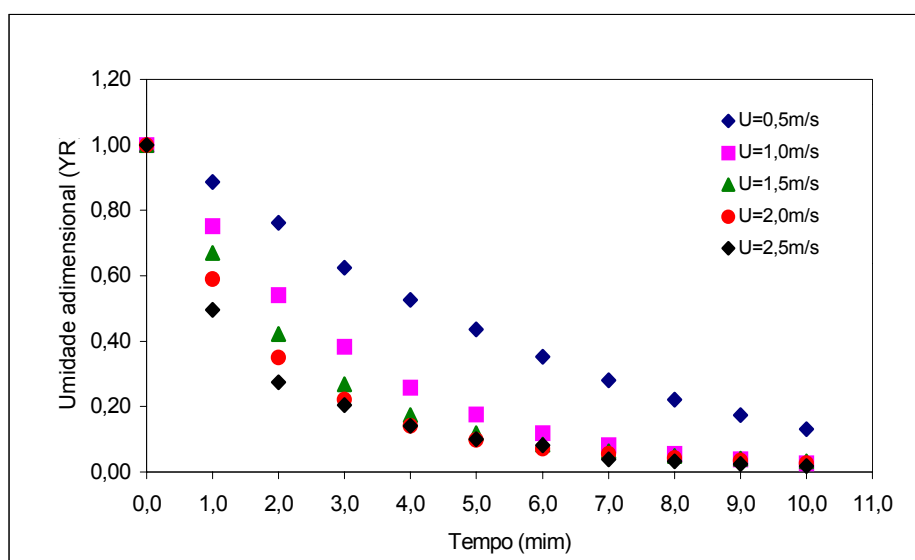


Figura 4.34: Umidade adimensional em função do tempo parametrizada na velocidade superficial do ar de secagem, para as partículas de alumina. $T = 80^{\circ}\text{C}$.

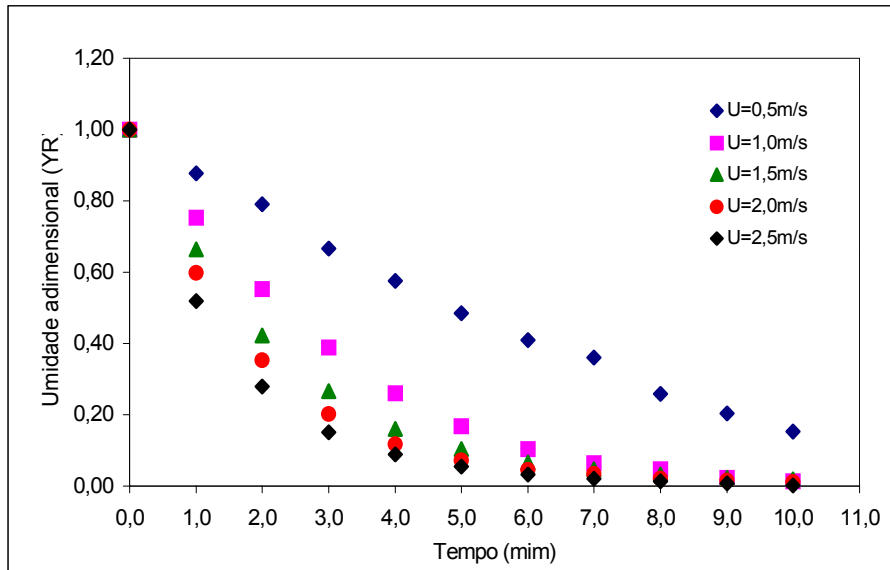


Figura 4.35: Umidade adimensional em função do tempo parametrizada na velocidade superficial do ar de secagem para as partículas de sílica-gel. T=80°C.

As figuras 4.36 a 4.39 apresentam as demais curvas de secagem em função da velocidade do ar para os demais níveis de temperaturas avaliadas, onde pode ser observado um comportamento semelhante em ambos os casos, conforme descrito anteriormente.

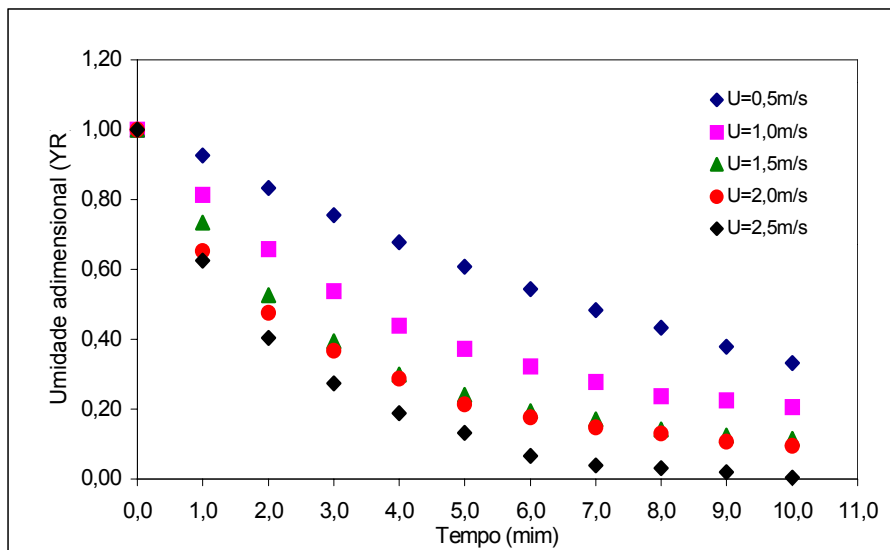


Figura 4.36: Umidade adimensional em função do tempo parametrizada na velocidade superficial do ar de secagem para as partículas de alumina. T=60°C.

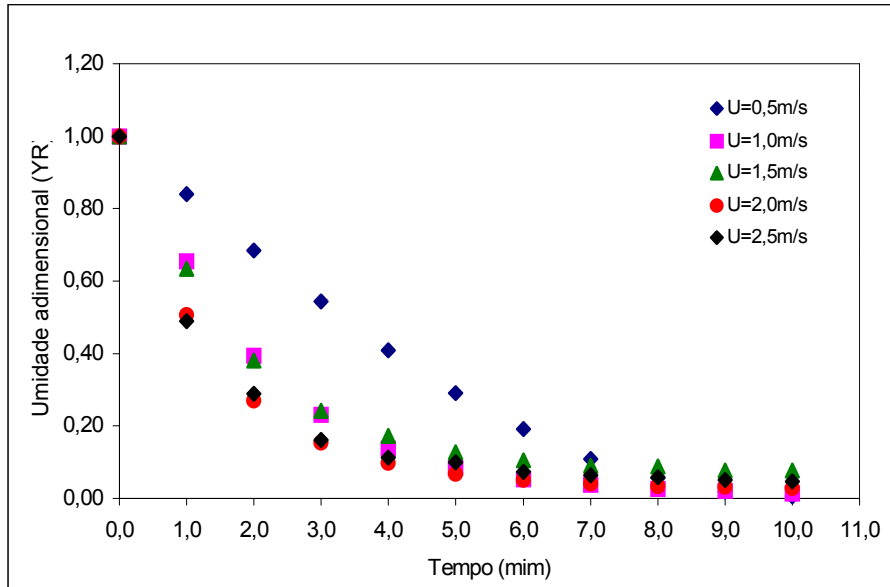


Figura 4.37: Umidade adimensional em função do tempo parametrizada na velocidade superficial do ar de secagem para as partículas de alumina. T=100°C.

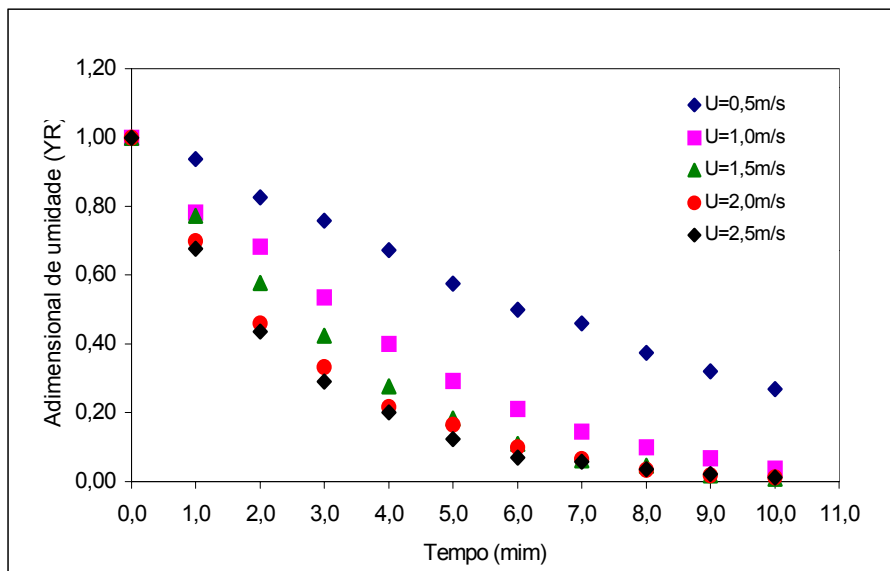


Figura 4.38: Umidade adimensional em função do tempo parametrizada na velocidade superficial do ar de secagem para as partículas de sílica-gel. T = 60 °C.

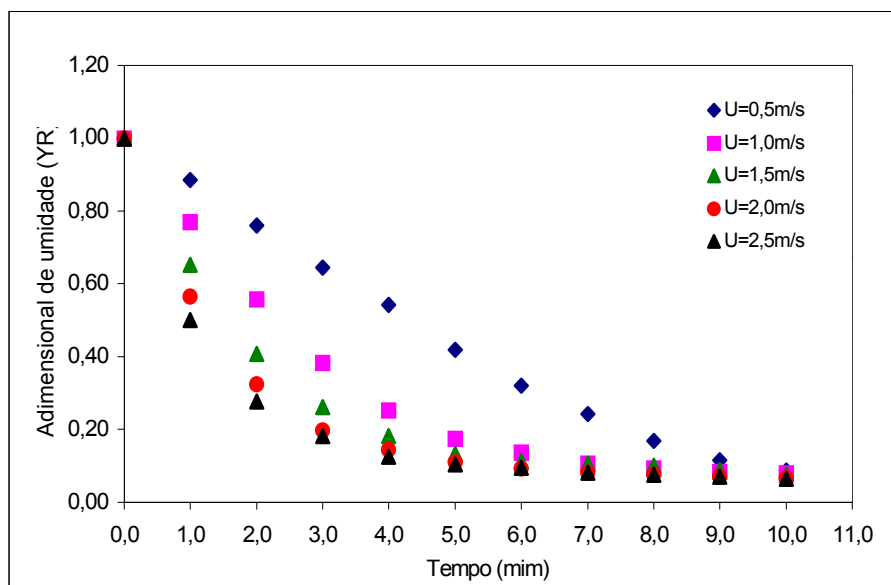


Figura 4.39: Umidade adimensional em função do tempo parametrizada na velocidade superficial do ar de secagem para as partículas de sílica-gel. $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

As figuras 4.40 e 4.41 apresentam a influência da temperatura no processo de secagem das partículas de alumina e sílica-gel, respectivamente. Nota-se que o processo é influenciado pela temperatura, porém esta influência é menor em relação à velocidade do ar de secagem para uma mesma temperatura. Isto pode ser explicado pelo fato de que mantidas as condições semelhantes de fluxo e umidade do ar, o aumento da transferência de energia resultante do aumento da diferença de temperatura entre o ar e o material sólido tenha uma parcela de contribuição menor comparativamente em relação ao aumento do fluxo de ar para uma mesma temperatura.

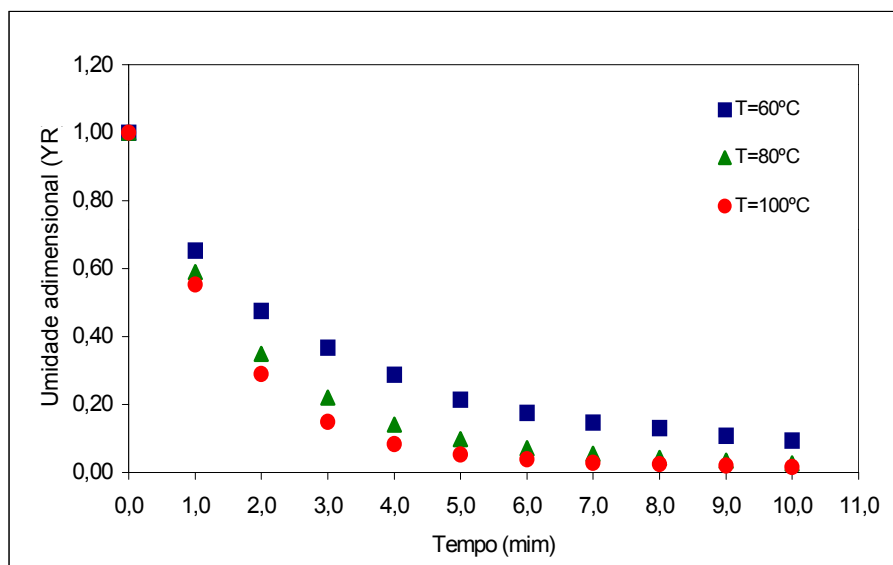


Figura 4.40: Umidade adimensional em função do tempo parametrizada na temperatura do ar de secagem para as partículas de alumina. $U = 2,0$ m/s.

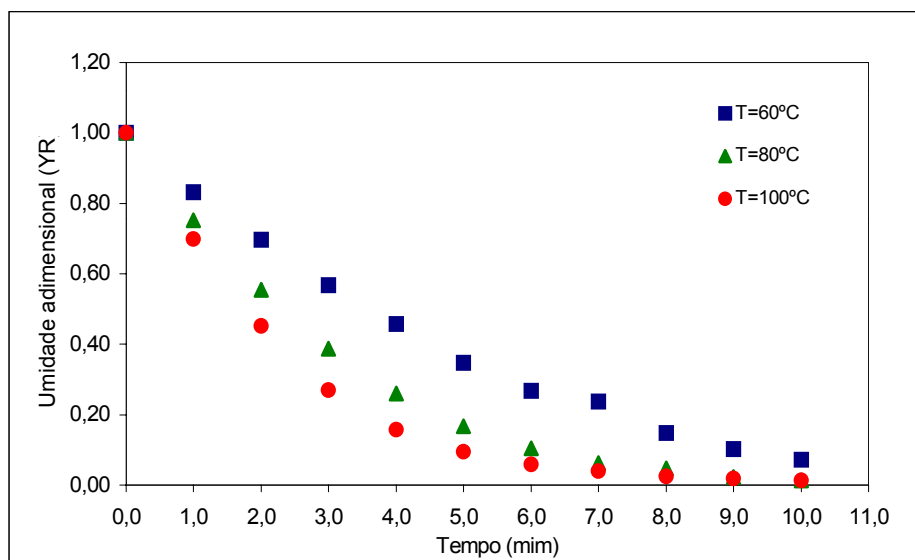


Figura 4.41: Umidade adimensional em função do tempo parametrizada na temperatura do ar de secagem para as partículas de sílica-gel. $U = 1,0$ m/s.

De acordo com a literatura, uma das formas de representar a secagem em camada fina é por intermédio de modelos empíricos e semi-empíricos, conforme descritos na Revisão Bibliográfica.

A obtenção dos parâmetros das equações de secagem foi feita com o auxílio do “software” STATISTICA 5.5, através de estimação não linear por mínimos quadrados, pelos métodos Simplex e Quasi-Newton, utilizando como conjunto de dados as 330 observações experimentais para cada sistema de partículas. O critério adotado para a determinação do melhor modelo que se ajustasse aos dados experimentais foi análogo ao critério utilizado na determinação das isotermas de equilíbrio. Os resultados obtidos dos ajustes estão apresentados nas tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4: Resultados obtidos via estimação não linear para as equações de secagem para as partículas de alumina.

EQUAÇÃO	PARÂMETROS	VALOR	R ²	ERRO MÉDIO (SE)	RAZÃO F
LEWIS Eq.2.26	a	1,17	0,924	1,50	1767,25
	b	97,80			
BROOKER Eq.2.27	a	0,97	0,925	2,14	3511,51
	b	1,15			
	c	98,66			
HENDERSON & HENDERSON Eq.2.28	a	1,08	0,927	1,48	1815,86
	b	100,55			
	c	0,89			
PAGE Eq. 2.29	a	1,24	0,927	1,48	1829,13
	b	87,08			
	n	0,85			
OVERHULTS Eq. 2.30	a	0,25	0,927	1,48	1829,13
	b	-102,37			
	n	0,85			
SRZDENICKI Eq. 2.31	a	0,94	0,926	0,94	710,79
	k1	164,09			
	E1	2154,82			
	b	0,04			
	k2	-19,98			
	E2	7215,00			
MANCINI Eq. 2.32	a1	-2,34	0,928	1,20	1233,97
	b1	-2,25			
	a2	0,057			
	b2	-0,002			

Tabela 4.5: Resultados obtidos via estimação não linear para as equações de secagem para as partículas de sílica-gel

EQUAÇÃO	PARÂMETROS	VALOR	R ²	ERRO MÉDIO (SE)	RAZÃO F
LEWIS Eq.2.26	a	0,92	0,918	2,34	3398,87
	b	76,40			
BROOKER Eq.2.27	a	0,92	0,918	1,65	1694,59
	b	76,46			
	c	1,00			
HENDERSON & HENDERSON Eq.2.28	a	0,86	0,917	1,66	1682,16
	b	77,37			
	c	0,92			
PAGE Eq. 2.29	a	0,94	0,918	1,65	1696,78
	b	74,46			
	n	0,97			
OVERHULTS Eq. 2.30	a	-0,07	0,918	1,65	1696,78
	b	-76,89			
	n	0,97			
SRZDENICKI Eq. 2.31	a	0,99	0,918	1,05	671,74
	k1	36,64			
	E1	1638,77			
	b	0,01			
	k2	-17,00			
	E2	7200,00			
MANCINI Eq. 2.32	a1	0,15	0,923	1,31	1204,18
	b1	-2,25			
	a2	0,006			
	b2	-0,003			

O modelo que mais se ajustou aos dados experimentais, tanto para o conjunto de partículas de alumina, como para as partículas de sílica-gel foi o modelo representado pela equação de Mancini, eq. 2.32. As equações de Henderson e Henderson, eq. 2.28, e Brooker *et al.*, eq. 2.27, também apresentaram bons ajustes aos dados experimentais para as partículas de alumina e sílica-gel, respectivamente. Os dados estatísticos referentes aos modelos testados se encontram no Apêndice E. Observa-se que todos os dados de distribuição residual apresentam resultados semelhantes para todos os modelos testados. A divergência entre os mesmos pôde ser evidenciada quando da análise das curvas de distribuição de frequência de resíduos, que associada aos demais critérios estabelecidos, resultaram na escolha dos modelos supracitados.

As figuras 4.42 e 4.43 apresentam as curvas de secagem experimentais e teóricas para as partículas de alumina e sílica-gel, respectivamente. As mesmas foram obtidas através dos

modelos propostos por Mancini, eq. 2.32, Henderson e Henderson, eq. 2.28 e Brooker *et al.*, eq. 2.27, os quais ajustaram-se melhor aos pontos experimentais obtidos.

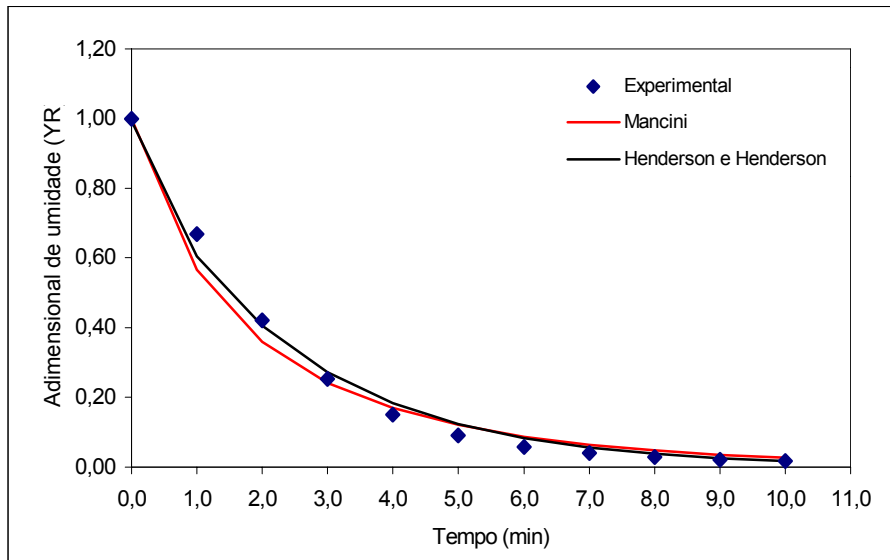


Figura 4.42: Umidade adimensional em função do tempo experimental e teórica para as partículas de alumina, obtidas através das equações de Mancini e de Henderson e Henderson. $U=1,0$ m/s – $T=100^{\circ}\text{C}$.

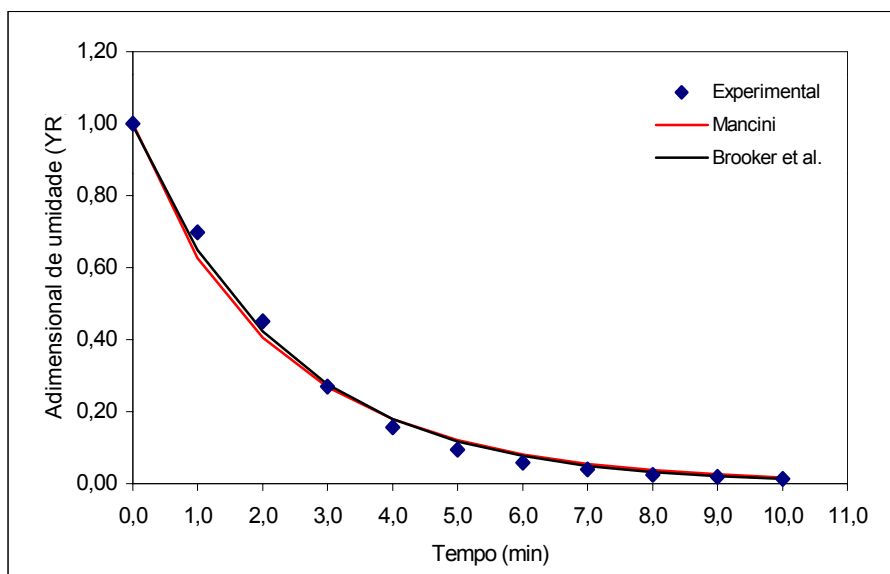


Figura 4.43: Umidade adimensional em função do tempo experimental e teórica para as partículas de sílica-gel, obtidas através das equações de Mancini e de Brooker *et al.*. $U=1,5$ m/s – $T=100^{\circ}\text{C}$

4.4) Determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa

Este item será dividido em duas partes: a primeira consiste da determinação experimental dos coeficientes de transferência de calor, h_p , e massa, k_p , utilizando a metodologia empregada por Kmiec (1975) e Serikawa *et al.* (1986) e a segunda na simulação dos perfis de umidade e temperatura dos sólidos utilizando o modelo a duas fases proposto por Massarani e Silva Telles (1992).

4.4.1) Determinação experimental dos coeficientes de transferência de calor e massa

A escolha dos leitos fluidizado e vibro-fluidizado nas operações que envolvem o processo de transferência de calor e massa é devido ao mesmo permitir um bom contato entre as partículas e o gás, funcionando como um bom misturador. De forma a verificar esta condição, foi traçado o mapa de temperatura ao longo do leito fluidizado, $H_0 = 0,09\text{m}$, em condições de regime permanente para partículas de alumina já secas. Os valores de temperatura foram aferidos com um termopar do tipo T e um termômetro de mercúrio previamente calibrados. Os valores obtidos ao longo do leito fluidizado são apresentados na figura 4.44, que mostra a vista superior do leito sendo que os valores de temperatura foram avaliados para três níveis de profundidade: $H = 0,03$, $0,06$ e $0,09$ m. Como os valores aferidos de temperatura nas três alturas do leito de partículas foram praticamente idênticos, a figura 4.44 apresenta somente os valores referentes à altura de $0,09\text{m}$.

As condições operacionais para determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa foram: altura do leito de partículas, $H = 0,09$ m, temperatura na base do leito, $T_b = 70,0^\circ\text{C}$,

amplitude vibracional, $A = 3,0 \times 10^{-3}$ m e parâmetro vibracional $\Gamma = 0,0, 0,5, 1,0$ e $1,5$ e velocidade do ar de secagem entre 1,34 a 1,35 m/s, para todos os ensaios realizados.

66,6	66,9	66,8	66,8	66,8	66,3
67,0	67,1	67,0	67,0	67,0	66,9
66,9	67,1	67,1	67,0	67,1	66,8
66,7	67,1	67,0	67,1	67,2	66,5

Figura 4.44: Mapa de temperatura ao longo do leito fluidizado. Valores de temperatura em °C - Vista superior do leito.

As figuras 4.45 e 4.46 apresentam os resultados obtidos para o processo de secagem de partículas de alumina e sílica-gel nos leitos fluidizado e vibro-fluidizado, respectivamente. Em todos os ensaios observa-se que as condições vibracionais impostas ao leito não influenciam de forma significativa a cinética de secagem. Nas figuras 4.45 e 4.46 pode-se observar que o período de taxa de secagem constante foi no máximo de 20 min, o que representa 1/3 do tempo de operação do sistema. A partir deste tempo, a migração interna da água é o fator determinante na cinética de secagem. O mecanismo que passa a governar o movimento da água é a difusão de vapor sob o efeito de um gradiente parcial de vapor d'água. Desta forma, a imposição de condições externas de energia vibracional não afeta a cinética de secagem, em função da mesma não interferir no fenômeno de migração da água do interior até a superfície das partículas. Em virtude deste comportamento, é de se esperar que os valores dos coeficientes de transferência de massa sejam muito semelhantes, mesmo para os diferentes valores do adimensional de vibração.

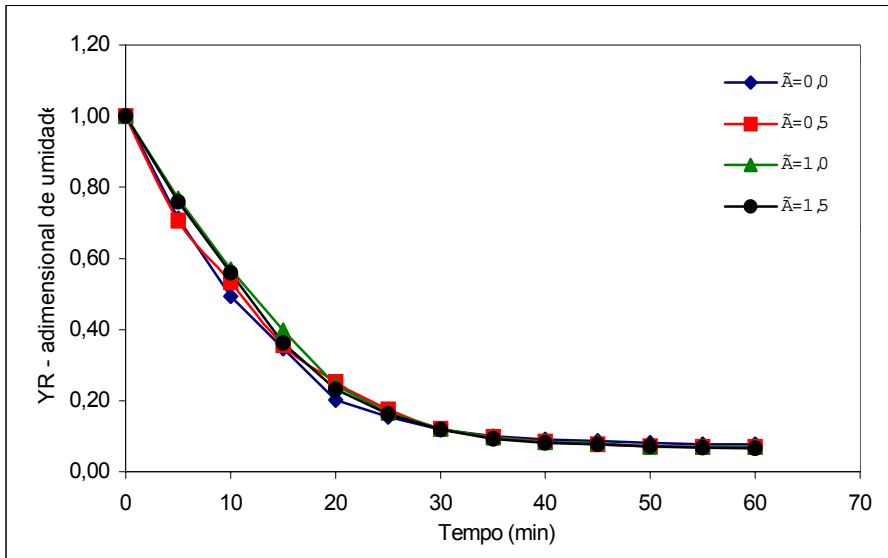


Figura 4.45: Umidade adimensional em função do tempo experimental parametrizado no adimensional de vibração para as partículas de alumina. $T_g = 70^\circ\text{C}$.

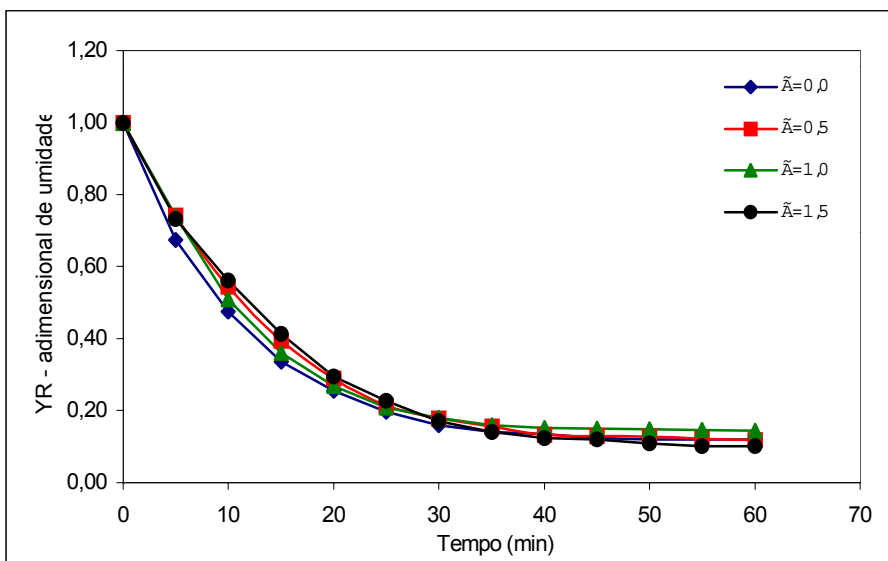


Figura 4.46: Umidade adimensional em função do tempo experimental parametrizado no adimensional de vibração para as partículas de sílica-gel. $T_g = 70^\circ\text{C}$.

As figuras 4.47 e 4.48 apresentam os perfis de temperatura experimentais obtidos para o conjunto de partículas de alumina e sílica-gel, respectivamente. Como os fenômenos de transferência de calor e massa estão acoplados durante o processo de secagem, observa-se que o

comportamento obtido foi semelhante ao da cinética de secagem. E, como consequência, os valores para os coeficientes de transferência de calor devem ser, também, semelhantes entre si.

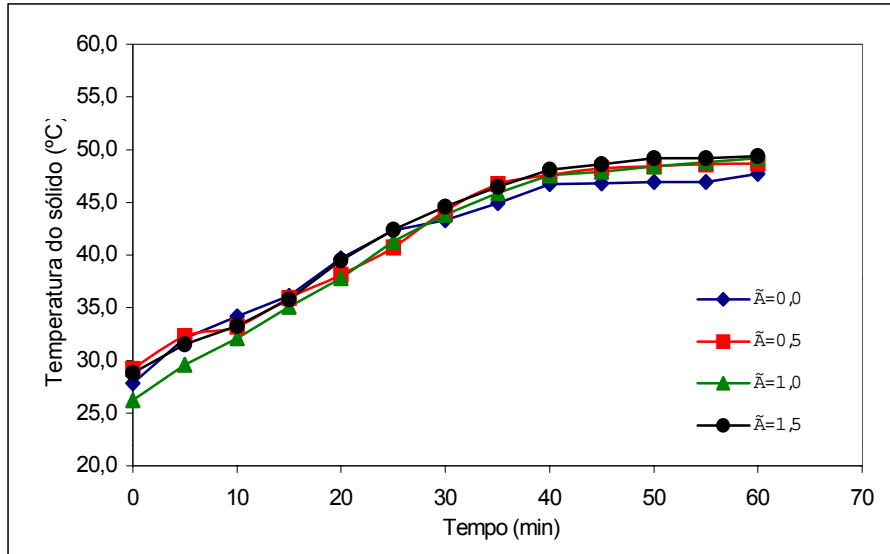


Figura 4.47: Temperatura do sólido em função do tempo experimental parametrizado no adimensional de vibração para as partículas de alumina. $T_g = 70^\circ\text{C}$.

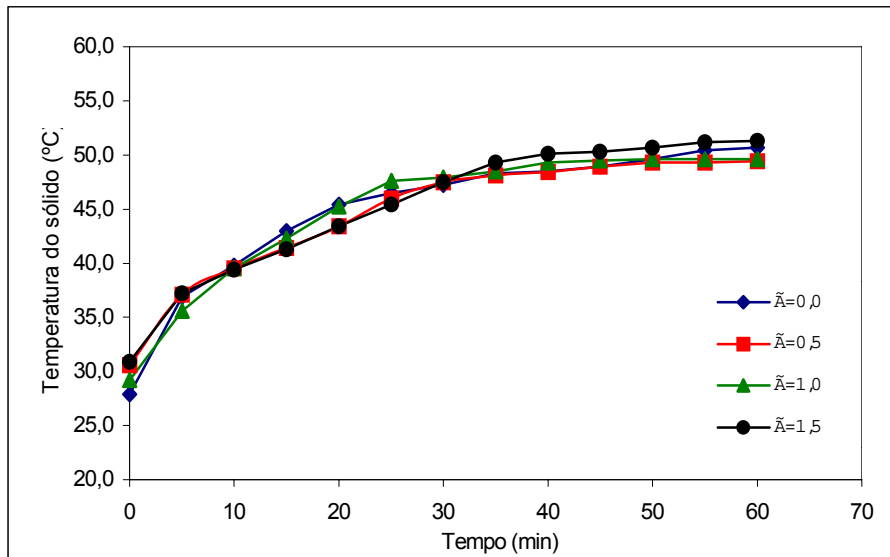


Figura 4.48: Temperatura do sólido em função do tempo experimental parametrizado no adimensional de vibração para as partículas de sílica-gel. $T_g = 70^\circ\text{C}$.

Os coeficientes de transferência de calor e massa para as partículas de alumina e sílica-gel estão apresentados nas tabelas 4.6 e 4.7, respectivamente. Os valores obtidos para os respectivos coeficientes, conforme a metodologia proposta por Kmiec (1975), são muito semelhantes, conforme já previsto a partir da cinética de secagem. Tanto para as partículas de alumina, como para as de sílica-gel, há um ligeiro acréscimo no valor do coeficiente de transferência de calor quando submetido à ação da energia vibracional, em relação ao valor obtido para o leito fluidizado. Os coeficientes de transferência de massa também apresentam um ligeiro acréscimo em função da imposição da energia vibracional imposta ao sistema, exceções para $\Gamma=0,5$ e $\Gamma=1,0$ para as partículas de alumina e sílica-gel, respectivamente, que apresentam coeficientes inferiores aos calculados para o leito fluidizado. Estes desvios observados estão dentro da faixa de erro experimental.

Tabela 4.6: Resultados experimentais obtidos para os coeficientes de transferência de calor e massa para as partículas de alumina.

Experimento	Vazão de ar (kg/s)	Γ	h_p (W/m ² °C)	k_p (m/s) x 10 ⁻⁴
1	0,044	0,00	29,78	5,51
2	0,047	0,50	34,97	5,19
3	0,045	1,00	32,20	5,57
4	0,045	1,50	30,14	5,61

Tabela 4.7: Resultados experimentais obtidos para os coeficientes de transferência de calor e massa para as partículas de sílica-gel.

Experimento	Vazão de ar (kg/s)	Γ	h_p (W/m ² °C)	k_p (m/s) x 10 ⁻⁴
1	0,044	0,00	15,63	3,32
2	0,044	0,50	19,31	3,67
3	0,044	1,00	17,44	3,17
4	0,043	1,50	17,83	3,99

A redução dos valores dos coeficientes de transferência de calor e massa com o aumento do adimensional de vibração, no período de taxa de secagem constante, foi observado por Li e Pan (1996), quando da secagem de partículas de sal. Quando fizeram a determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa levando-se em conta todo o processo de secagem, estes aumentaram com o aumento do adimensional de vibração.

Os dados referentes aos ensaios experimentais estão apresentados no Apêndice F.

4.4.2) Simulação dos perfis de umidade e temperatura dos sólidos

A determinação experimental dos coeficientes de transferência de calor e massa para as partículas de alumina e sílica-gel, permitiu obter os perfis de umidade e temperatura dos sólidos simulados através do modelo proposto por Massarani e Silva Telles (1992), equações 2.34 a 2.40.

Conforme a metodologia proposta por Kmiec (1975), os coeficientes de transferência de calor e massa foram determinados para o período de taxa de secagem constante. Para todos os ensaios realizados, este período foi de no máximo vinte minutos, com uma variação média de 5°C na temperatura dos sólidos. Estes valores foram utilizados para prever os perfis de umidade e temperatura dos sólidos ao longo de toda a secagem, no processo de simulação. Os resultados obtidos via simulação, são apresentados nas figuras 4.49 a 4.64. As figuras 4.49 a 4.52 e 4.53 a 4.56 apresentam os perfis de umidade dos sólidos em função do tempo de secagem para as partículas de alumina e sílica-gel, respectivamente. A utilização dos coeficientes de transferência de calor e massa, determinados experimentalmente, na simulação não conduziu a perfis de umidade que reproduzissem de forma satisfatória o comportamento do processo de secagem para ambas as partículas trabalhadas. Como a técnica utilizada para a determinação dos coeficientes

utiliza apenas os primeiros 20 min do processo, já se esperava que a concordância entre os valores previstos e os medidos não fossem próximos. O que se previa porém é que os valores teóricos variassem mais significativamente com o tempo, e para tempos superiores a 20 min estes estivessem abaixo do valor realmente medido. Poderiam ser utilizadas técnicas mais elaboradas de estimativa de parâmetros porém uma análise das equações (2.34) a (2.37), mostrou que a parte difusiva tanto na transferência de massa como na de calor foram desprezadas, portanto, este modelo não representa fisicamente bem o processo que se está estudando. A estimativa dos perfis de temperatura foi bem melhor e representa satisfatoriamente os valores experimentais encontrados, como é apresentado nas figuras 4.57 a 4.64.

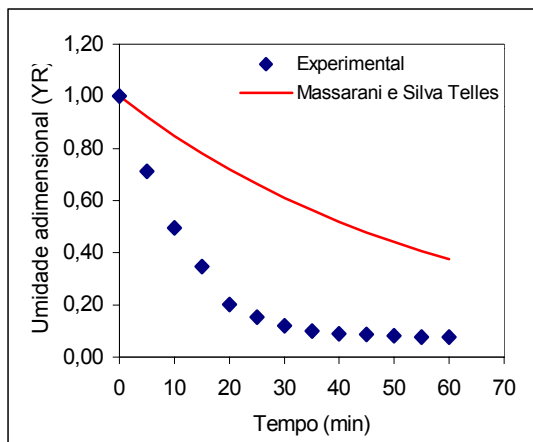


Figura 4.49: Umidade adimensional em função do tempo para partículas de alumina $\Gamma = 0,0 - T_g = 70^\circ\text{C}$.

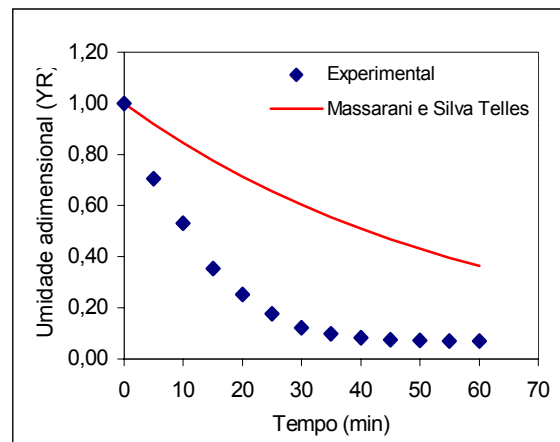


Figura 4.50: Umidade adimensional em função do tempo para partículas de alumina $\Gamma = 0,5 - T_g = 70^\circ\text{C}$.

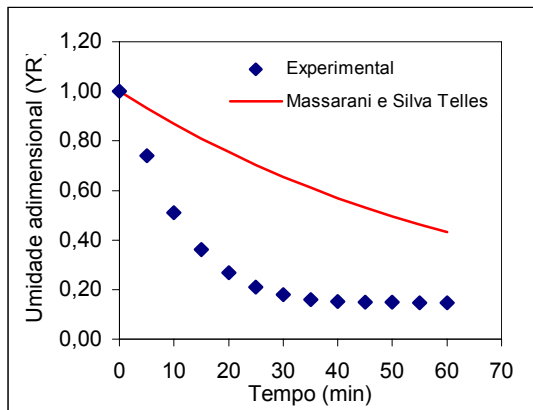


Figura 4.51: Umidade adimensional em função do tempo para partículas de alumina $\Gamma = 1,0 - T_g = 70^\circ\text{C}$.

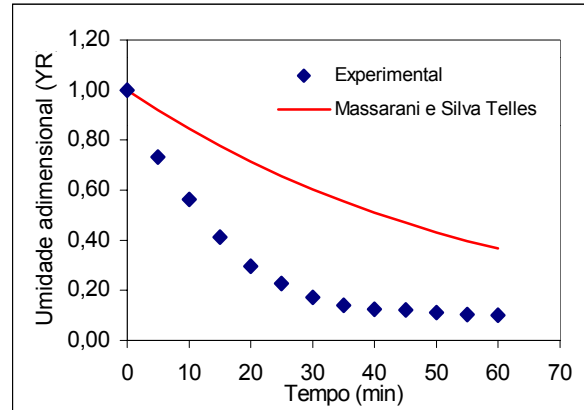


Figura 4.52: Umidade adimensional em função do tempo para partículas de alumina $\Gamma = 1,5 - T_g = 70^\circ\text{C}$.

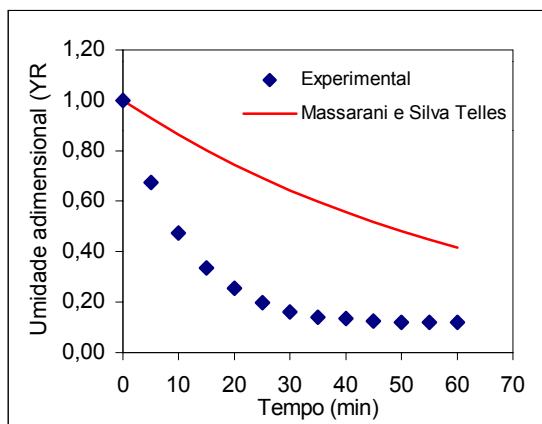


Figura 4.53: Umidade adimensional em função do tempo para partículas de sílica-gel $\Gamma = 0,0 - T_g = 70^\circ\text{C}$.

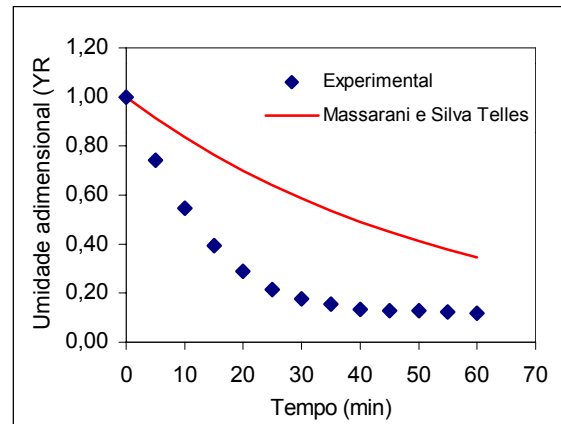


Figura 4.54: Umidade adimensional em função do tempo para partículas de sílica-gel $\Gamma = 0,5 - T_g = 70^\circ\text{C}$.

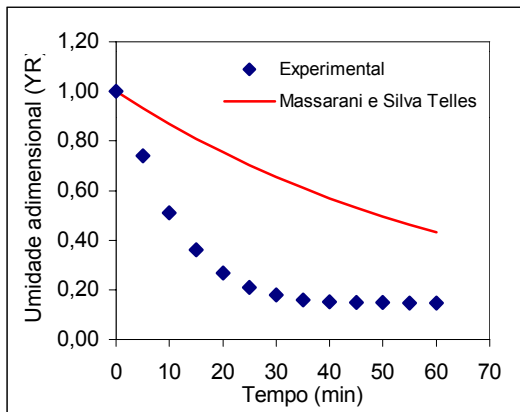


Figura 4.55: Umidade adimensional em função do tempo para partículas de sílica-gel $\Gamma = 1,0 - T_g = 70^\circ\text{C}$.

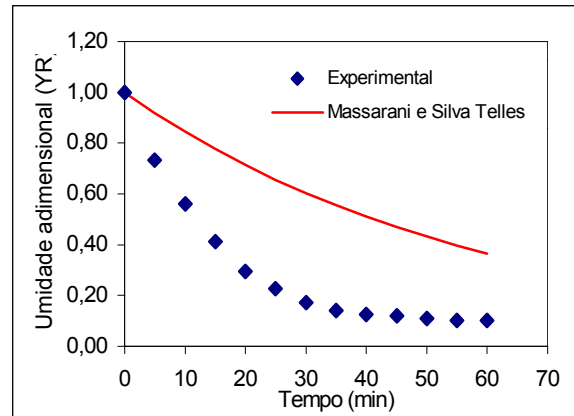


Figura 4.56: Umidade adimensional em função do tempo para partículas de sílica-gel $\Gamma = 1,5 - T_g = 70^\circ\text{C}$.

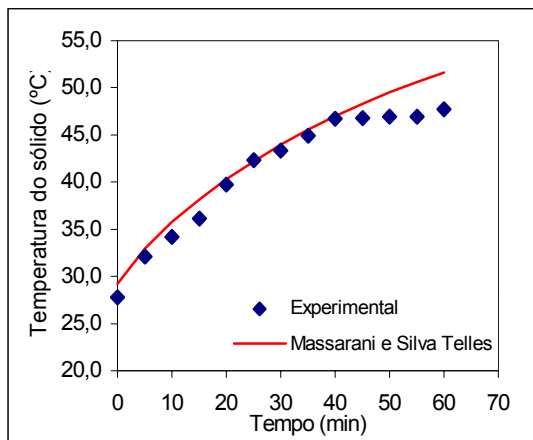


Figura 4.57: Temperatura do sólido em função do tempo para partículas de alumina $\Gamma = 0,0 - T_g = 70^\circ\text{C}$.

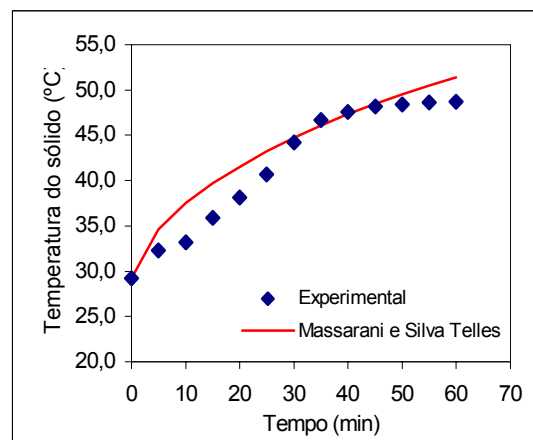


Figura 4.58: Temperatura do sólido em função do tempo para partículas de alumina $\Gamma = 0,5 - T_g = 70^\circ\text{C}$.

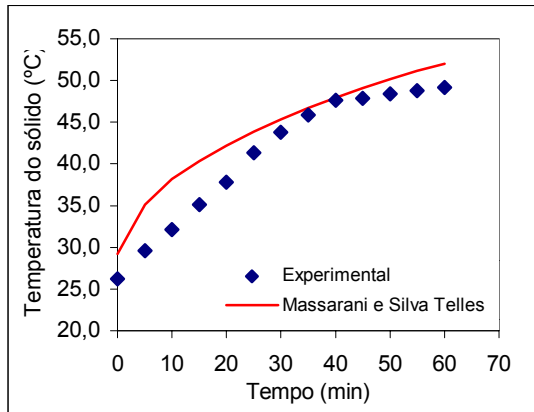


Figura 4.59: Temperatura do sólido em função do tempo para partículas de alumina $\Gamma = 1,0 - T_g = 70^\circ\text{C}$.

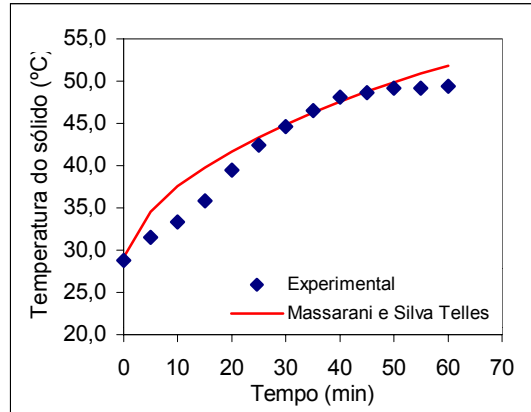


Figura 4.60: Temperatura do sólido em função do tempo para partículas de alumina $\Gamma = 1,5 - T_g = 70^\circ\text{C}$.

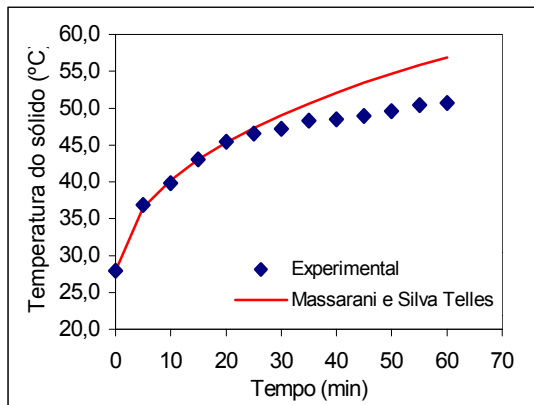


Figura 4.61: Temperatura do sólido em função do tempo para partículas de sílica-gel $\Gamma = 0,0 - T_g = 70^\circ\text{C}$.

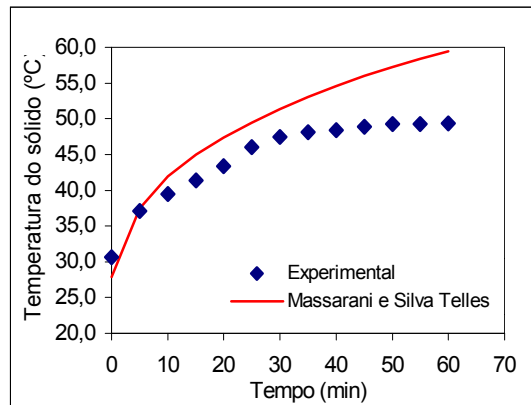


Figura 4.62: Temperatura do sólido em função do tempo para partículas de sílica-gel $\Gamma = 0,5 - T_g = 70^\circ\text{C}$.

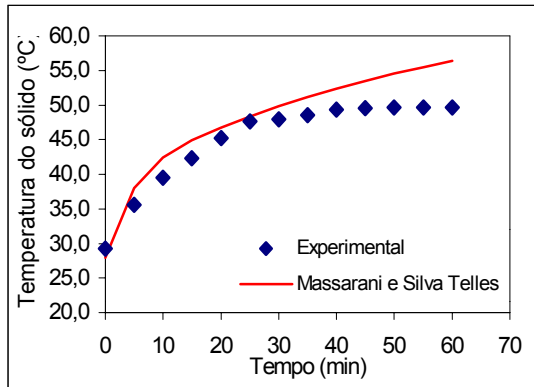


Figura 4.63: Temperatura do sólido em função do tempo para partículas de sílica-gel $\Gamma = 1,0$ - $T_g = 70^\circ\text{C}$.

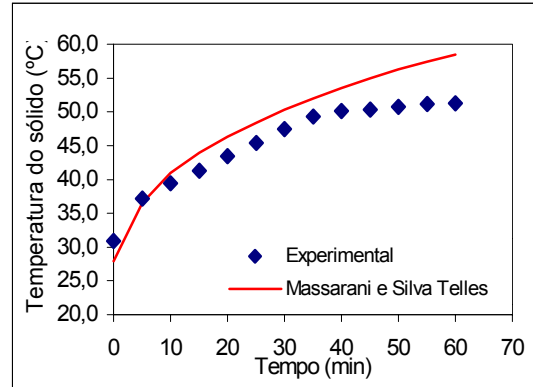


Figura 4.64: Temperatura do sólido em função do tempo para partículas de sílica-gel $\Gamma = 1,5$ - $T_g = 70^\circ\text{C}$.

Possivelmente a utilização de uma outra técnica para a determinação experimental dos coeficientes de transferência de calor e massa, que envolvam todo o processo de secagem, possa conduzir a perfis de umidade e temperatura dos sólidos que expressem com maior precisão os dados experimentais. Além disso pode-se utilizar o modelo sem desprezar a parte difusiva do fenômeno. A tentativa porém de usar o modelo simplificado conduz a resultados que não representam a realidade experimental.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Em conformidade com os objetivos propostos e os resultados experimentais deste trabalho foi possível obter o conjunto de conclusões, que serão apresentadas em sub-itens relacionados à fluidodinâmica, isotermas de equilíbrio, cinética de secagem e coeficientes de transferência de calor e massa, considerando-se as condições operacionais trabalhadas.

5.1) Fluidodinâmica

A metodologia empregada na determinação das curvas características e das curvas de desvio padrão mostrou-se adequada, face a reprodutividade dos dados experimentais em todos os ensaios, facilmente verificada através das réplicas obtidas.

As curvas características obtidas para as partículas de alumina e sílica gel, tanto para o leito fluidizado quanto para o leito vibro-fluidizado são semelhantes às encontradas na literatura.

Quando da imposição da energia vibracional ao leito ocorreu uma redução da queda de pressão no leito, em virtude da maior facilidade do ar percolar através do mesmo.

Para os leitos submetidos à vibração houve a redução da velocidade de mínima fluidização comparativamente aos leitos fluidizados, de acordo com a definição da U_{mf} para o leito fluidizado.

A queda de pressão tanto para os leitos fluidizado e vibro-fluidizado aumentou de forma significativa em função do aumento da altura do leito de partículas, sendo que os valores obtidos de queda de pressão são inferiores relativamente aos observados para o leito fluidizado.

Para o leito fluidizado a velocidade de mínima fluidização mostrou-se pouco influenciável pela altura do leito de partículas.

O aumento da amplitude vibracional, para um valor fixo do adimensional de vibração, contribuiu para a redução da queda de pressão e este aumento é pouco observado para partículas de menor diâmetro.

O aumento do diâmetro das partículas tanto para o leito fluidizado quanto para o vibro-fluidizado diminuiu a queda de pressão no leito para a região de leito fixo, sendo que na região fluidizada o aumento do diâmetro das partículas contribui para o aumento da queda de pressão no leito fluidizado e promove a redução da queda de pressão para o leito vibro-fluidizado, comparativamente à região de leito fixo.

O aumento do diâmetro das partículas promoveu o aumento da velocidade de mínima fluidização, tanto para o leito fluidizado quanto para o leito vibro-fluidizado.

O adimensional de vibração promove um aumento da queda de pressão na região de leito fixo, em virtude da compactação das partículas no leito. Na região fluidizada há uma redução da queda de pressão com o aumento do parâmetro vibracional, comparativamente ao leito fluidizado. A redução da queda de pressão foi menos perceptível para partículas de menores diâmetros.

As curvas de desvio padrão da queda de pressão podem representar o comportamento fluidodinâmico do leito.

As curvas de desvio padrão mostraram-se pouco influenciáveis pela altura do leito de partículas para o leito fluidizado, apresentando praticamente o mesmo comportamento, embora

haja um aumento significativo na região de fluidização bem desenvolvida. Já para o leito vibro-fluidizado as curvas de desvio padrão apresentaram variações significativas com a altura do leito de partículas.

Com o aumento da amplitude vibracional não se verificou fortes oscilações nas curvas de desvio padrão, as quais apresentaram comportamento semelhante dentro da faixa avaliada, não permitindo verificar alterações no comportamento fluidodinâmico do leito nestas condições.

O aumento do diâmetro das partículas ocasionou uma redução do desvio padrão tanto para o leito fluidizado quanto para o leito sob vibração, mas para o leito fluidizado, na região de leito fixo, os valores do desvio padrão são pouco influenciados pelo diâmetro das partículas. Os valores de desvio padrão tornaram-se mais significativos somente para valores mais elevados de velocidade do ar.

As curvas de desvio padrão foram fortemente influenciadas pelo parâmetro vibracional e pela velocidade do ar e quanto maiores os mesmos, maiores os valores dos desvios observados.

5.2) Isotermas de equilíbrio

A metodologia empregada mostrou-se adequada em virtude da obtenção de dados reprodutíveis, possibilitando um melhor ajuste aos modelos matemáticos constantes na literatura.

As partículas de sílica-gel apresentaram uma maior sensibilidade em função das variações das condições externas ambientais, em virtude das estufas não serem perfeitamente isoladas do meio externo, ocasionando um maior período para se atingir o equilíbrio termodinâmico.

A utilização de métodos estatísticos possibilitou a determinação do melhor modelo que se ajustou aos dados experimentais, sendo que a equação de Sabbah, eq. (2.25), apresentou tanto para as partículas de alumina quanto para as partículas de sílica-gel o melhor ajuste.

5.3) Cinética de secagem

A metodologia empregada na determinação das curvas de secagem mostrou-se adequada, face a reprodutividade dos dados experimentais em todos os ensaios, facilmente verificada através das réplicas obtidas.

A velocidade e a temperatura do ar de secagem influenciaram de forma significativa a secagem das partículas sendo que, o efeito da temperatura foi menos pronunciado do que o efeito da velocidade do ar, dentro das condições operacionais estabelecidas.

O efeito convectivo foi bastante pronunciado, em ambos os casos, até uma velocidade do ar de secagem de 1,5 m/s, após a qual, o efeito difusivo passou a preponderar.

A utilização de métodos estatísticos possibilitou a determinação dos melhores modelos que se ajustaram aos dados experimentais, sendo que a equação de Mancini, eq. (2.32), apresentou o melhor ajuste tanto para as partículas de alumina quanto para as partículas de sílica-gel.

As equações de Henderson e Henderson, eq. 2.28 e de Brooker *et al.*, eq. 2.27, também apresentaram bons ajustes aos dados experimentais para as partículas de alumina e sílica-gel, respectivamente.

5.4) Coeficientes de transferência de calor e massa e simulação

Os coeficientes de transferência de calor e massa obtidos experimentalmente foram pouco influenciados pelo adimensional de vibração, em virtude do mecanismo difusivo estar controlando boa parte do processo de secagem nas situações operacionais estudadas.

Apesar da pouca influência do adimensional de vibração nos coeficientes de transferência de calor e massa, os valores obtidos para os mesmos no leito vibro-fluidizado foram maiores comparativamente ao leito fluidizado.

O modelo utilizado não representou bem as condições experimentais encontradas na secagem, uma vez que grande parte desta foi controlada pela difusão e o modelo usado desprezou este termo.

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES

Com o objetivo de dar continuidade a este trabalho são apresentadas as seguintes sugestões:

- realizar estudos que envolvam o comportamento fluidodinâmico das partículas de alumina e sílica-gel em leitos de diferentes geometrias, associados às diferentes condições operacionais de frequência, amplitude, diâmetro das partículas e altura do leito de partículas;
- avaliar a influência do adimensional de vibração no comportamento fluidodinâmico das partículas quando submetidos a altos valores de frequência e a baixa amplitude e vice-versa;
- implementar mecanicamente o sistema de forma a viabilizar altos valores do adimensional de vibração;
- realizar modificações mecânicas no leito que permita a realização de estudos de secagem com a alimentação contínua de partículas;
- realizar ensaios experimentais sob diferentes condições de velocidade do ar de secagem, de frequência e amplitudes de vibração e altura do leito de partículas para o sistema particulado formado pela alumina e sílica-gel e verificar as influências sobre os coeficientes de transferência de calor e massa;

- utilizar modelos mais condizentes com a situação encontrada nos leitos fluidizados e vibro-fluidizados e utilizar métodos de estimativa de parâmetros que utiliza toda a duração do processo, e
- realizar estudos de secagem de diferentes sistemas particulados em leitos fluidizados e vibro-fluidizados (sementes de gramíneas, soja, café, milho, etc).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, P. & SHENE, C., Experimental study of the heat and mass transfer during drying in a fluidized bed dryer, *Drying Technology*, Vol 14 (3&4), p.701-718, 1996.
- ASHRAE, Handbook of fundamentals, Atlanta, USA, 1997.
- BAKHAN, G. K., ZHIRNOVA, G. G., MIKHAILOV, G. M., TYABIN, N. V., Trudy Volgo Gradskogo Polit. Inst. Ser. Khin. 1970. In: STRUMILLO, C., PAKOWSKI, Z., *Drying of Granular Products in Vibrofluidized Beds*. In: *Drying 80*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, Vol.1, p211-226, 1980.
- BARROZO, M. A. S., Transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante e escoamentos cruzados. PPG-EQ/UFSCAR, São Carlos – 1995, 163p. (Tese).
- BERTOLDO, L. C., REIS, G. G., CALÇADA, L. A., WILDHAGEN, G. R. S., Secagem de sementes de agrião em leito fluidizado: Validação de um modelo matemático. XXX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, São Carlos – SP, (2002) *no prelo*.
- BRATU, E. & JINESCU, G. I., Effect of vertical vibration on the pressure drop in a fluidized layer, *British Chemical Engineering*, Vol.16 (8), p.691-695, 1971.

BROOKER, D.B., BAKKER-ARKEMA, F. W., EHALL, C.W., Drying cereal grains, The Avi Publishing Company, Inc., Westport, 1974

CALÇADA, L. A., WILDHAGEN, G. R. S., Abordagem da secagem via processo de saturação adiabático para o ar. XXX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, São Carlos – SP, (2002) *no prelo*.

CAMARGO, C. F. S., Determinação do coeficiente global de transferência de calor de um cilindro submerso em um leito vibro fluidizado. PPG-EQ/UFSCAR, São Carlos – SP, 146p. 1998 (Dissertação).

CAMARGO, C. F. S., FREIRE, J. T., Fluidodinâmica de um leito vibro-fluidizado: Análise das curvas de desvio padrão. Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. São João Del Rei – MG, 2001 – (CD-ROM).

CHEN, Z., AGARWAL, P. K. & AGNEW, J. B., Steam drying of coal. Part. 2. Modeling the operation of a fluidized bed drying unit, Fuel, Vol 80, p.209-223, 2001.

CHEN, C.S., CLAYTON, J. T., The effect of temperature on sorption Isotherms of biological materials, Transactions of the ASAE, p. 927-929, 1971.

CHEVILENKO, V. A., MUSHTAYEV, V. I., KOROTOKOV, V. M., IZHORIM, G. L., LYALIN, V. A., PLANOVSKI, A. N., 1979, In: PAKOWSKI, Z., MUJUMDAR, A. S., STRUMILLO, C. Theory and Application of Vibrated Beds for Drying

Process, In: *Advances in Drying*, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, Vol. 3, p.245-306, 1984.

CHUNG, D. S., PFOST, H. B., Adsorption and desorption of water vapour by cereal grains and their products, *Transactions of the ASAE*, p. 549-551, 1967.

DALEFFE, R.V., Análise da presença do glicerol no comportamento fluidodinâmico de leitos fluidizado e vibro-fluidizado, PPG-EQ/UFSCAR, São Carlos – SP, 2002, 205p. (Dissertação).

DALEFFE, R.V., CAMARGO, C. F. S., FREIRE, J. T., Análise da presença do glicerol no comportamento fluidodinâmico de leitos fluidizado e vibro-fluidizado, *Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, São João Del Rei – MG, 2001, (CD-ROM).

DELLA TONIA JR, V. G., FREIRE, J. T. & TOBINAGA, S. Leito vibro-fluidizado I: Desenvolvimento do equipamento e teste preliminares, *Anais do XVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, Vol 1, p.307-311, Ed. UFSCar, São Carlos-SP, 1989.

ERDÉSZ, K. & ORMÓS, Z., Bed expansion and pressure drop in vibrofluidized layers, *Drying Technology*, Vol. 12, p.169-177, 1984.

ERDÉSZ, K; MUJUMDAR, A.S; RINGER, D.U., Hydrodynamic Similarity of Conventional and Vibrated Fluidized Beds. In: *Drying 86* Hemisphere Publishing Corporation, New York, Vol.1, p.169-176, 1986.

ERDÉSZ, K., Hidrodinamic studies on vibrated fluidized beds, *Power Handling & Processing*, Vol.2 (4), p.327-339, 1990.

ERDÉSZ, K., Vibrational thermal processing equipment design and application, *Monografia*, p.132, 1991.

FOUST, A. S., WENZEL, L. A., CLUMP, C.W. & ANDERSEN, L. B., *Princípios das Operações Unitárias*, ed. LTC, 2ª ed., Rio de Janeiro – RJ, 1982.

GARIM, M.M., FREIRE, J. T., Leito vibro-fluidizado aerado: Estudos relacionados a determinação de U_{mvf} e ΔP_{mvf} . *Anais do X Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, São Paulo – SP, Vol.1, p.295-300, 1994.

GARIM, M.M., Estudo dos coeficientes de transferência de massa em leitos fluidizados e vibro-fluidizados. PPG-EQ/UFSCAR, São Carlos - SP, 1998, 140p. (Tese).

GARIM, M.M., FREIRE, J. T., Uma análise das curvas características de leitos fluidizados e vibro-fluidizados utilizando as curvas de desvio padrão das medidas realizadas. *Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, Teresópolis – RJ, Ed. UFRRJ, Vol.1, p.253-259, 1998.

GELDART, D., Types of gas fluidization. Powder Technology, Netherlands, Vol.7, p.285-292, 1973.

GROENEWOLD, H. & TSOTSAS, E., A new model for fluid bed drying, Drying Technology, Vol.15 (6-8), p.1687-1698, 1997.

GUPTA. R. & MUJUMDAR. A. S., Aerodynamic and thermal characteristics of vibrated fluid bed – A review, Drying 80, Hemisphere Publishing Corporation, Vol.1, p.141-150, New York, 1980a.

GUPTA. R. & MUJUMDAR. A. S., Aerodynamics of a Vibrated fluid bed, The Canadian Journal of Chem. Engineering, Vol. 58, p.332-338, 1980b.

HAN, W., MAI, B. & GU, TINGAN., Residence time distribution and drying characteristics of a continuous vibrofluidized bed, Drying Technology, Vol.9 (1). p.159-181, 1991.

HENDERSON, S. M., A basic concept of equilibrium moisture, Agricultural Engineering, p.29-32, 1952.

HENDERSON, J. M., HENDERSON, S. M., A computational procedure for deep-bed drying analysis, J. Agric. Eng. Res., Vol. 13, p.87-95, 1968.

- HOEBINK, J. H. B. J. & RIETEMA, K., Drying granular solids in fluidized bed – I, Chem. Eng. Science, Vol.35, p.2135-2140, 1980a.
- HOEBINK, J. H. B. J. & RIETEMA, K., Drying granular solids in fluidized bed – II, Chem. Eng. Science, Vol.35, p.2257-2265, 1980b.
- HOVMAND, S., Fluidized Bed Drying. In: MUJUNDAR, A. S., Handbook of Industrial Drying, 2 ed, New York, Marcel Dekker Inc., p.195-248, 1995.
- KANNAN, C. S., THOMAS, P. P. & VARMA, B.G., Drying of solids in fluidized beds, Ind. Eng. Chem. Res. Vol.34, p.3068-3077, 1995.
- KMIEC, A., Simultaneous Heat and Mass Transfer in Spouted Bed, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 53, p.18-24, 1975.
- KUNII, D. & LEVENSPIEL, O., Fluidization Engineering, 2nd ed., Stoneham, MA: Butterworth-Heinemann, 1991.
- LEWIS, W. K., The rate of drying of solids materials. In: The Symposium on Drying. The Journal of I. & E. Ch. Vol. 13(5), p.427-432, 1921.
- LI, Z.Y. & PAN, Y. K., Heat and mass transfer for drying of common salt in a vibrofluid bed, Drying 96 – Proceedings of the 10th International Drying Symposium, Vol. A, p.598-604, 1996.

- MALHOTRA, K., LAW-KWET-CHEONG, L., MUJUMDAR, A. S., Pressure Drop Characteristics for Vibrated Beds of Dry and Sticky Particles. Powder Technology, Netherlands, Vol.39, p.101-105, 1984.
- MANCINI, M. C., Transferência de massa em secadores de grãos, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 142p. 1996. (Tese).
- MASSARANI, G. & TELLES, A. S., Aspectos da secagem em sistemas particulados. In: FREIRE, J. T., *et al.*, Tópicos Especiais em secagem, São Carlos, SP, 1992.
- MESQUITA, J. B., ANDRADE, E. T., CORRÊA, P. C., Modelos matemáticos e curvas de umidade de equilíbrio de sementes de jacarandá-da-bahia, angico-vermelho e óleo-copaíba. Revista CERNE, Vol. 7, N.2, p.12-21, 2001.
- MOYERS, C.G. & BALDWIN, G.W., Solids Drying Fundamentals, In: PERRY, R. H.& GREEN, D.W., Chemical Engineers' Handbook, Ed. Mc Graw-Hill Companies, ed. 7^a, Sec.12-25, 1999.
- MUSHTAYEV, V. I., KOROTOV, B. M., CHEVILENKO, V. A., EFIMOV, M. G., PLANOVSKI, A. N., 1972, Teoret. Osnovy khim. In: STRUMILLO, C., PAKOWSKI, Z., Drying of Granular Products in Vibrofluidized Beds. In: Drying 80, Hemisphere Publishing Corporation, New York, Vol.1, p211-226, 1980.

- NIKOV, I. & DELMAS, H., Solid-liquid Mass Transfer in three-phase fixed and fluidized beds, *Chem. Eng. Science*, Vol.42 (5), p.1089-1093, 1987.
- OSBORN, G. S., WHITE, G. M., SULAIMAN, A . H., WALTON, L .R., Predicting equilibrium moisture properties of soybeans, *Transactions of the ASAE*, 32(6), p.2109-2114, 1989.
- OVERHULTZ, D. G., WHITE, G. M., HAMILTON, H. E., ROSS, I. J., Drying of soybeans with heated air, *Transactions of the ASAE*, Vol. 16, p.112-113, 1973.
- PAGE, C., Factors influencing the maximum rate of drying shelled corn in layers, M.S Thesis, Purdue University, 1949.
- PAKOWSKI, Z., MUJUNDAR, A. S. & STRUMILLO, C., Theory and application of vibrated beds and vibrated fluid beds for drying process. In: *Advances in Drying*, Washington, ed. Hemisphere Publishing Corporation, Vol.3, p.245-306, 1984.
- PALÁNCZ, B., A mathematical model for continuous fluidized bed drying, *Chem. Eng. Science*, Vol.38 (7), p.1045-1059, 1983.
- PRADO, M. M., Secagem de sementes de mamão papaya. PPG-EQ/UFSCAR, São Carlos – SP, 1999, 108p. (Dissertação).

SERIKAWA, R. M., GIUDICI, R., NASCIMENTO, C. A. O., Transferência de calor gás-partícula em vasos cônicos com leito de jorro, Anais do II Congresso Latino Americano de Transferência de Calor e Massa, São Paulo, Vol.2, p.790-799, 1986.

STRUMILLO, C. & PAKOWSKI, Z., Drying of granular products in vibrofluidized beds, Drying 80: Development in drying, Vol.1, p.211-226, Ed. A.S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corp., New York, 1980.

TOSTSAS, E., From single particle to fluid bed drying kinetics, Drying Technology, Vol.12 (6), p.1401-1426, 1994a.

TOSTSAS, E., Discrimination of fluid bed models and investigations of particle-to-gas mass transfer by means of drying experiments, Chem. Eng. Process, Vol.33, p.237-245, 1994b.

VANECEK, V., MARKVART, M. & DRBOHLAV, R., Fluidized Bed Drying, Ed. Leonard Hill Books, London, 1966.

VITOR, J. F. A., BISCAIA JR, E. C., MASSARANI, G., Estimação dos coeficientes de transferência de calor e massa na secagem de tapioca em leito fluidizado. XXX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, São Carlos – SP, (2002) *no prelo*.

WANG, Z. H. & CHEN, G., Heat and mass transfer in batch fluidized bed drying of porous particles, Chemical Engineering Science, Vol.55, p.1857-1869, 2000.

WEN, C. Y., YU, Y. H., *Mechanics of Fluidization*. Chemical Engeneering Progress Symposium Ser., Vol. 62, n.62, p.100-111, 1966.

WILDHAGEN, G. R. S., SILVA, E.F., CALÇADA, L. A. & MASSARANI, G., *Estimação de parâmetros na secagem em leito fluidizado*, Anais do XXVI, Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Vol.II, p.393-398, Teresópolis-RJ, 1998.

WILDHAGEN, G. R. S., CALÇADA, L. A. & MASSARANI, G., *Modelagem da secagem em leito fluidizado: Modelo a três fases*, Anais do XXVII, Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Vol.I, p.499-506, Campos do Jordão-SP, 2000.

WILDHAGEN, G. R. S., CALÇADA, L. A. & MASSARANI, G., *Drying of porous particles in fluidized beds: Modelling and experiments*, *Journal of Porous Media*, Vol. 5(2), p.123-133, 2002.

YAMAZAKI, R., KANAGAWA, Y. & JIMBO, G., *Heat transfer in vibro-fluidized bed*, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol.7 (5), p.373-378, 1974.

APÊNDICE A

**DADOS EXPERIMENTAIS PARA AS PARTÍCULAS DE ALUMINA E
SÍLICA-GEL REFERENTES À FLUIDODINÂMICA**

APÊNDICE B

DADOS EXPERIMENTAIS NO EQUILÍBRIO PARA AS PARTÍCULAS DE ALUMINA E SÍLICA-GEL REFERENTES ÀS ISOTERMAS DE EQUILÍBRIO

Tabela B.1: Dados experimentais no equilíbrio, desvio padrão e média para as partículas de alumina. T = 30°C.

DIA	LiCl	CH ₃ COOK	MgCl ₂	K ₂ CO ₃	NaNO ₂	NaCl	KCl
1	2,4224	2,4043	2,4844	2,5163	2,3678	2,4641	2,4276
	2,3146	2,4005	2,4193	2,4123	2,4488	2,3630	2,4918
	2,3945	2,4447	2,3996	2,3648	2,4241	2,4736	2,4319
final	2,1052	2,1327	2,2503	2,3781	2,3606	2,5106	2,5774
	2,0102	2,1248	2,1915	2,2749	2,4475	2,4072	2,5963
	2,0876	2,1654	2,1749	2,2307	2,4229	2,5185	2,5362
massa s.seco estufa 24h	2,0241	2,0171	2,0958	2,1181	1,9970	2,0852	2,1030
	1,9416	2,0194	2,0397	2,0310	2,0709	2,0045	2,1235
	2,0114	2,0548	2,0271	1,9941	2,0772	2,0965	2,0754
umidade equilíbrio	0,0401	0,0573	0,0737	0,1228	0,1821	0,2040	0,2256
	0,0353	0,0522	0,0744	0,1201	0,1819	0,2009	0,2227
	0,0379	0,0538	0,0729	0,1187	0,1664	0,2013	0,2220
Desvio Padrão	0,0024	0,0026	0,0008	0,0021	0,0090	0,0017	0,0019
Média	0,0378	0,0544	0,0737	0,1205	0,1768	0,2021	0,2234
massa água estufa 24h	0,0811	0,1156	0,1545	0,2600	0,3636	0,4254	0,4744
	0,0686	0,1054	0,1518	0,2439	0,3766	0,4027	0,4728
	0,0762	0,1106	0,1478	0,2366	0,3457	0,4220	0,4608
umidade relativa soluções salinas	0,113	0,216	0,324	0,432	0,635	0,750	0,834

Tabela B.2: Dados experimentais no equilíbrio, desvio padrão e média para as partículas de alumina. T = 45°C.

DIA	LiCl	CH ₃ COOK	MgCl ₂	K ₂ CO ₃	NaNO ₂	NaCl	KCl
1	2,4616	2,4434	2,483	2,5697	2,4594	2,5472	2,4616
	2,5349	2,6191	2,5283	2,4692	2,5156	2,5591	2,4076
	2,4975	2,5841	2,5345	2,6030	2,5189	2,4390	2,5523
final	2,1337	2,1581	2,2323	2,3948	2,4242	2,5846	2,5531
	2,1976	2,3056	2,2796	2,2976	2,4809	2,5968	2,4852
	2,1654	2,3180	2,2810	2,4253	2,4843	2,4740	2,6287
massa s.seco estufa 24h	2,0524	2,0440	2,0730	2,1559	2,0612	2,1444	2,0843
	2,1203	2,1851	2,1108	2,0674	2,1170	2,1528	2,0396
	2,0870	2,2377	2,1181	2,1880	2,1144	2,0460	2,1544
umidade equilíbrio	0,0396	0,0558	0,0768	0,1108	0,1761	0,2053	0,2249
	0,0365	0,0551	0,0800	0,1113	0,1719	0,2062	0,2185
	0,0376	0,0359	0,0769	0,1085	0,1749	0,2092	0,2202
Desvio Padrão	0,0016	0,0113	0,0018	0,0015	0,0022	0,0020	0,0033
Média	0,0379	0,0490	0,0779	0,1102	0,1743	0,2069	0,2212
massa água estufa 24h	0,0813	0,1141	0,1593	0,2389	0,363	0,4402	0,4688
	0,0773	0,1205	0,1688	0,2302	0,3639	0,444	0,4456
	0,0784	0,0803	0,1629	0,2373	0,3699	0,4280	0,4743
umidade relativa soluções salinas	0,111	0,195	0,314	0,432	0,603	0,747	0,808

Tabela B.3: Dados experimentais no equilíbrio, desvio padrão e média para as partículas de alumina. T = 60°C.

DIA	LiCl	CH ₃ COOK	MgCl ₂	K ₂ CO ₃	NaNO ₂	NaCl	KCl
1	2,5854	2,5649	2,5406	2,6451	2,5500	2,6569	2,6176
	2,5899	2,5238	2,5953	2,6869	2,6749	2,7179	2,6624
	2,5217	2,5323	2,6197	2,6355	2,6004	2,5662	2,6782
final	2,2216	2,2498	2,2609	2,4244	2,4954	2,6803	2,6486
	2,2379	2,2065	2,3113	2,4547	2,5998	2,7378	2,7079
	2,1817	2,2026	2,3335	2,4127	2,5152	2,5856	2,7218
massa s.seco estufa 24h	2,1494	2,1703	2,1245	2,2401	2,1704	2,2482	2,1786
	2,1746	2,1292	2,1879	2,2650	2,2615	2,2931	2,2452
	2,1197	2,1254	2,2103	2,2249	2,1901	2,1609	2,2503
umidade equilíbrio	0,0336	0,0366	0,0642	0,0823	0,1497	0,1922	0,2157
	0,0291	0,0363	0,0564	0,0838	0,1496	0,1939	0,2061
	0,0292	0,0363	0,0557	0,0844	0,1484	0,1965	0,2095
Desvio Padrão	0,0025	0,0002	0,0047	0,0011	0,0007	0,0022	0,0049
Média	0,0306	0,0364	0,0588	0,0835	0,1493	0,1942	0,2104
massa água estufa 24h	0,0722	0,0795	0,1364	0,1843	0,325	0,4321	0,47
	0,0633	0,0773	0,1234	0,1897	0,3383	0,4447	0,4627
	0,062	0,0772	0,1232	0,1878	0,3251	0,4247	0,4715
umidade relativa soluções salinas	0,096	0,175	0,295	0,421	0,565	0,703	0,751

Tabela B.4: Dados experimentais no equilíbrio, desvio padrão e média para as partículas de sílica-gel. T = 30°C.

DIA	LiCl	CH ₃ COOK	MgCl ₂	K ₂ CO ₃	NaNO ₂	NaCl	KCl
1	2,0400	2,1552	1,9770	2,0932	2,0618	1,9230	2,0539
	1,9976	2,0469	2,0951	1,9586	1,9757	2,1305	2,0677
	1,9776	1,9054	2,0999	2,2068	2,1573	2,0497	2,1902
final	1,6433	1,8187	1,7480	2,0263	2,0215	1,9232	2,0676
	1,6172	1,7256	1,9170	1,8951	1,9364	2,1324	2,0718
	1,5906	1,6137	1,8626	2,1395	2,1317	2,0517	2,1946
massa s.seco estufa 24h	1,5694	1,6619	1,5096	1,6131	1,5769	1,4622	1,5667
	1,5347	1,5675	1,6513	1,5020	1,5108	1,6279	1,5586
	1,5155	1,4632	1,6118	1,6827	1,6828	1,5621	1,6507
umidade equilíbrio	0,0471	0,0943	0,1579	0,2562	0,2819	0,3153	0,3197
	0,0538	0,1009	0,1609	0,2617	0,2817	0,3099	0,3293
	0,0496	0,1029	0,1556	0,2715	0,2668	0,3134	0,3295
Desvio Padrão	0,0034	0,0044	0,0027	0,0078	0,0087	0,0027	0,0056
Média	0,0501	0,0994	0,1581	0,2631	0,2768	0,3129	0,3262
massa água estufa 24h	0,0739	0,1568	0,2384	0,4132	0,4446	0,4610	0,5009
	0,0825	0,1581	0,2657	0,3931	0,4256	0,5045	0,5132
	0,0751	0,1505	0,2508	0,4568	0,4489	0,4896	0,5439
umidade relativa soluções salinas	0,113	0,216	0,324	0,432	0,635	0,750	0,834

Tabela B.5: Dados experimentais no equilíbrio, desvio padrão e média para as partículas de sílica-gel. T = 45°C.

DIA	LiCl	CH ₃ COOK	MgCl ₂	K ₂ CO ₃	NaNO ₂	NaCl	KCl
1	2,2457	2,1956	2,2137	2,4088	2,2836	2,1691	2,2468
	2,2289	2,2899	2,2072	2,2814	2,2358	2,2069	2,1776
	2,3124	2,1855	2,1191	2,2954	2,2123	2,2516	2,2939
final	1,7996	1,8156	1,9219	2,3056	2,2256	2,1578	2,2394
	1,7948	1,8894	1,9221	2,1841	2,1834	2,1958	2,1757
	1,8580	1,8058	1,8423	2,1932	2,1648	2,2378	2,2911
massa s.seco estufa 24h	1,7138	1,6621	1,6960	1,8393	1,7453	1,6475	1,7032
	1,6909	1,7375	1,6989	1,7482	1,6925	1,6731	1,6503
	1,7777	1,6715	1,6240	1,7479	1,6930	1,7027	1,7474
umidade equilíbrio	0,0501	0,0924	0,1332	0,2535	0,2752	0,3097	0,3148
	0,0614	0,0874	0,1314	0,2493	0,2900	0,3124	0,3184
	0,0452	0,0803	0,1344	0,2548	0,2787	0,3143	0,3111
Desvio Padrão	0,0084	0,0060	0,0015	0,0028	0,0078	0,0023	0,0036
Média	0,0522	0,0867	0,1330	0,2525	0,2813	0,3121	0,3148
massa água estufa 24h	0,0858	0,1535	0,2259	0,4663	0,4803	0,5103	0,5362
	0,1039	0,1519	0,2232	0,4359	0,4909	0,5227	0,5254
	0,0803	0,1343	0,2183	0,4453	0,4718	0,5351	0,5437
umidade relativa soluções salinas	0,111	0,195	0,314	0,432	0,603	0,747	0,808

Tabela B.6: Dados experimentais no equilíbrio, desvio padrão e média para as partículas de sílica-gel. T = 60°C.

DIA	LiCl	CH3COOK	MgCl2	K2CO3	NaNO3	NaCl	KCl
1	2,1719	2,2987	2,3780	2,4012	2,1545	2,3436	2,4191
	2,4054	2,2193	2,2733	2,2338	2,386	2,2684	2,2305
	2,2262	2,2993	2,4001	2,3562	2,3647	2,2593	2,2411
final	1,7385	1,8819	2,0094	2,1710	2,0523	2,3015	2,3703
	1,9378	1,7986	1,9121	1,9969	2,2977	2,2289	2,1978
	1,7756	1,8691	2,0262	2,1076	2,2705	2,2165	2,1981
massa s.seco estufa 24h	1,6434	1,7516	1,7972	1,8174	1,6163	1,7586	1,7976
	1,8325	1,6771	1,7106	1,6818	1,7879	1,7007	1,6691
	1,6881	1,7414	1,8127	1,7833	1,7632	1,6961	1,6697
umidade equilíbrio	0,0579	0,0744	0,1181	0,1946	0,2698	0,3087	0,3186
	0,0575	0,0724	0,1178	0,1874	0,2851	0,3106	0,3168
	0,0518	0,0733	0,1178	0,1819	0,2877	0,3068	0,3165
Desvio Padrão	0,0034	0,0010	0,0002	0,0064	0,0097	0,0019	0,0012
Média	0,0557	0,0734	0,1179	0,1879	0,2809	0,3087	0,3173
massa água estufa 24h	0,0951	0,1303	0,2122	0,3536	0,4360	0,5429	0,5727
	0,1053	0,1215	0,2015	0,3151	0,5098	0,5282	0,5287
	0,0875	0,1277	0,2135	0,3243	0,5073	0,5204	0,5284
umidade relativa soluções salinas	0,096	0,175	0,295	0,421	0,565	0,703	0,751

APÊNDICE C

DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE RESÍDUOS E DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS PARA AS PARTÍCULAS DE ALUMINA E SÍLICA-GEL REFERENTES ÀS EQUAÇÕES DE ISOTERMA DE EQUILÍBRIO

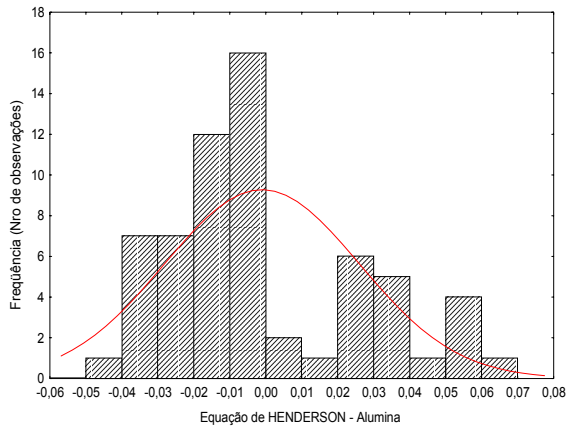


Figura C.1: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Henderson. Alumina.

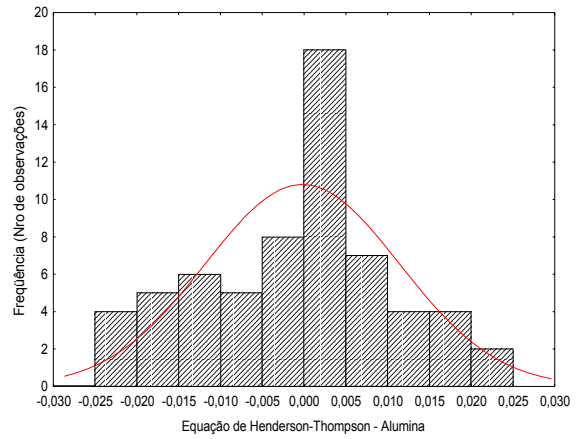


Figura C.2: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Henderson - Thompson. Alumina.

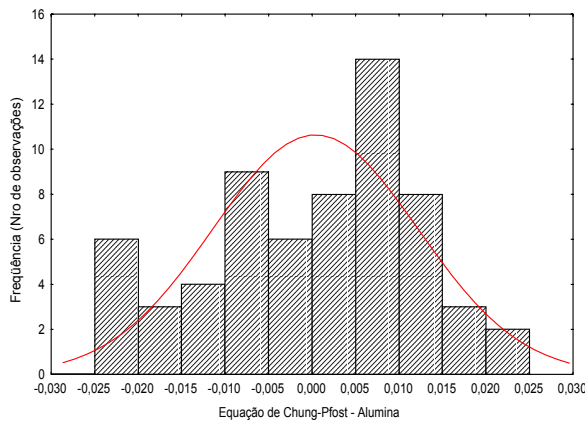


Figura C.3: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Chung-Pfost. Alumina.

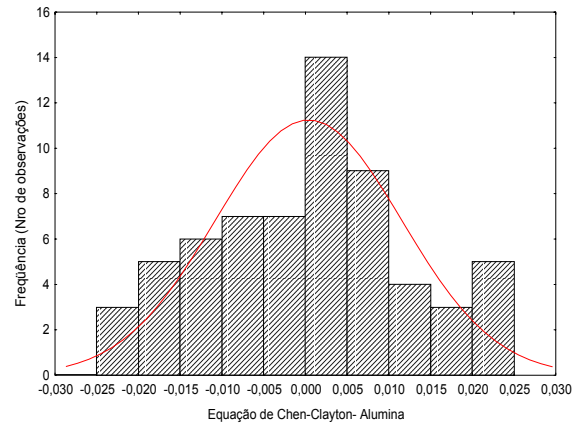


Figura C.4: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Chen - Clayton. Alumina.

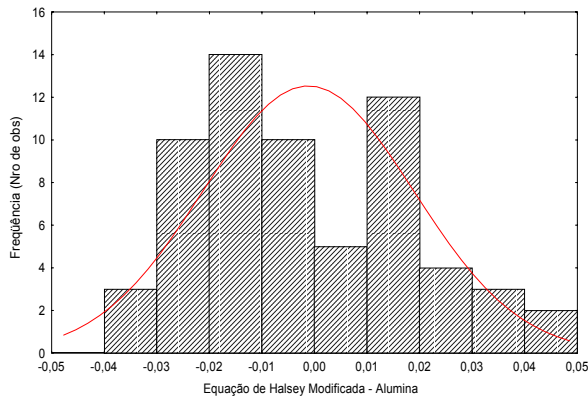


Figura C.5: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Halsey-modificada Alumina.

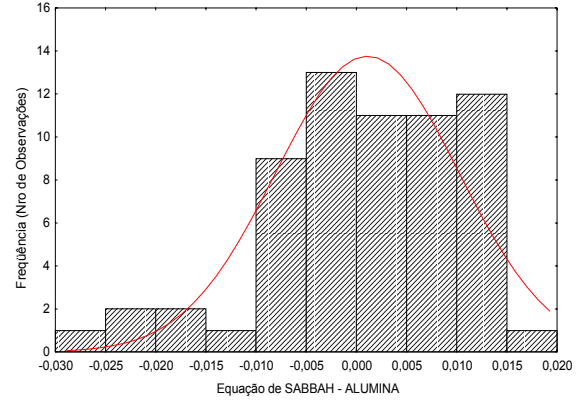


Figura C.6: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Sabbah. Alumina.

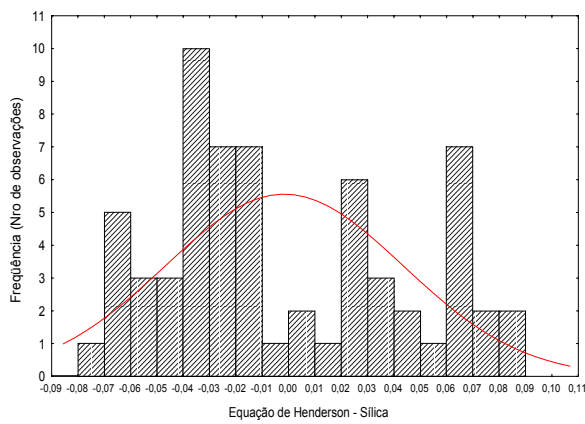


Figura C.7: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Henderson. Sílica-gel.

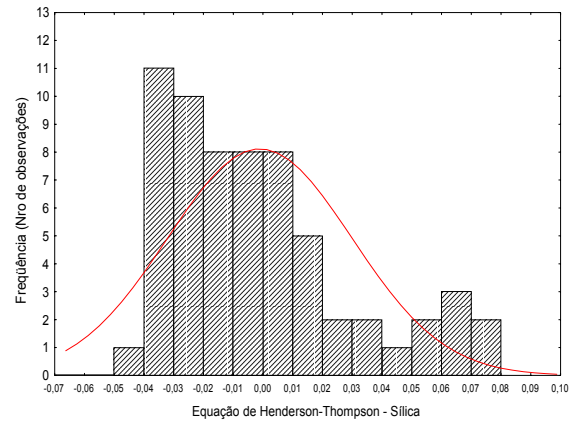


Figura C.8: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Henderson - Thompson. Sílica-gel.

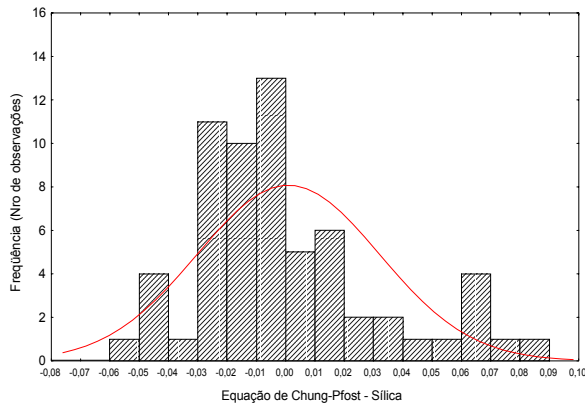


Figura C.9: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Chung-Pfost. Sílica-gel.

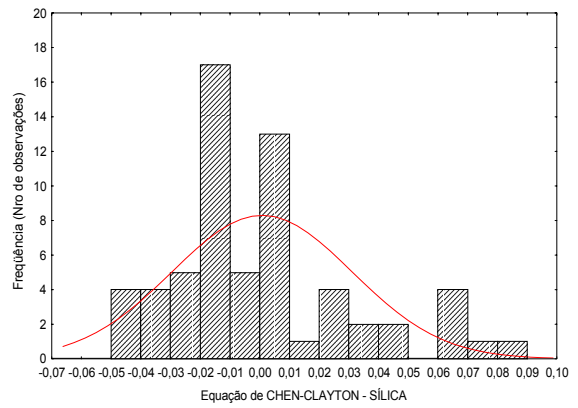


Figura C.10: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Chen - Clayton. Sílica-gel.

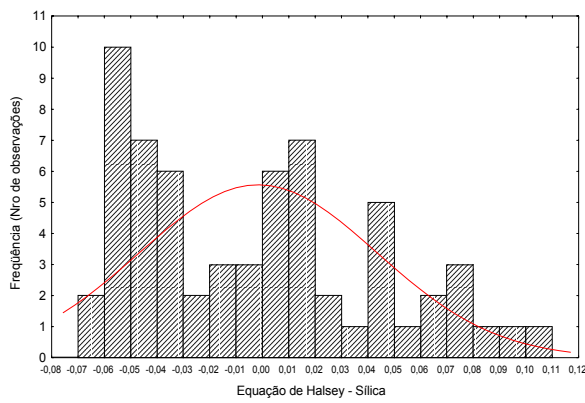


Figura C.11: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Halsey-modificada Sílica-gel.

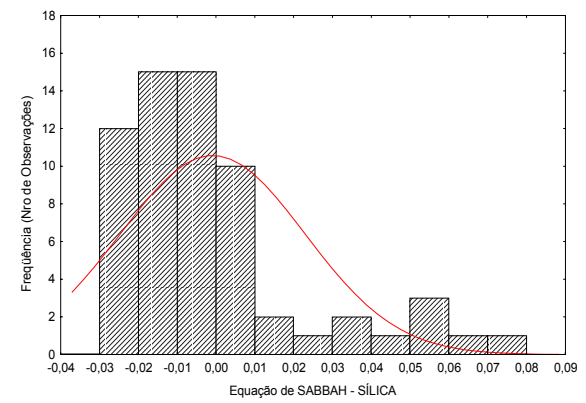


Figura C.12: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Sabbah. Sílica-gel.

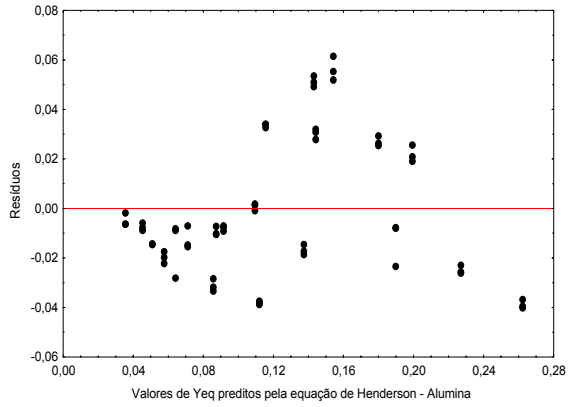


Figura C.13: Distribuição de resíduos em função dos valores de Yeq preditos pela equação de Henderson. Alumina.

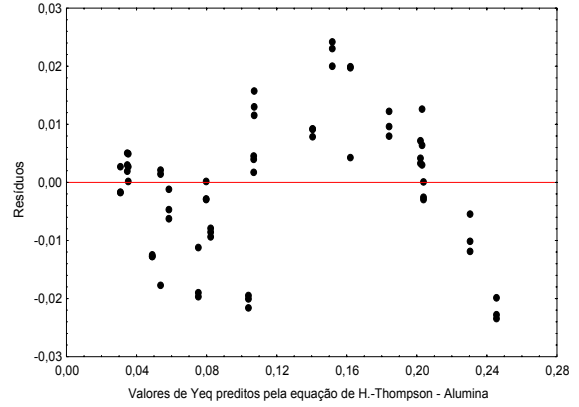


Figura C.14: Distribuição de resíduos em função dos valores de Yeq preditos pela equação de Henderson-Thompson. Alumina.

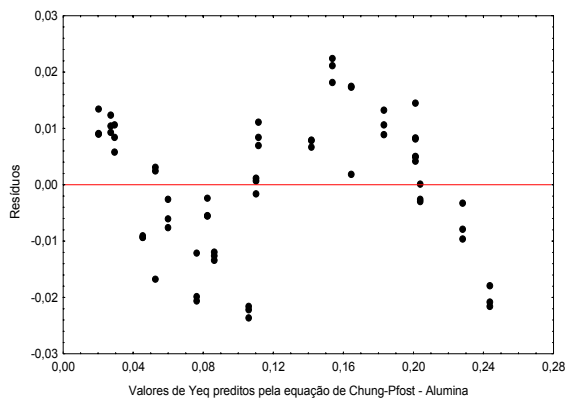


Figura C.15: Distribuição de resíduos em função dos valores de Yeq preditos pela equação de Chung-Pfost. Alumina.

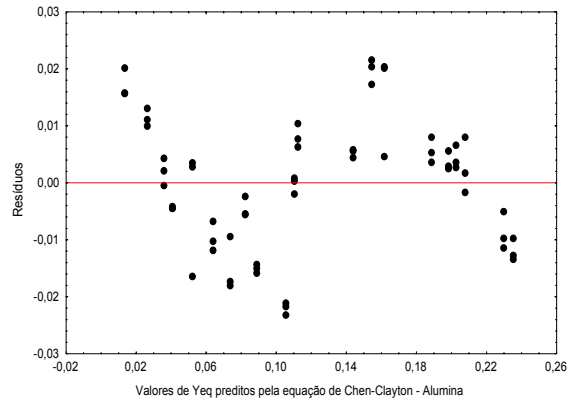


Figura C.16: Distribuição de resíduos em função dos valores de Yeq preditos pela equação de Chen-Clayton. Alumina.

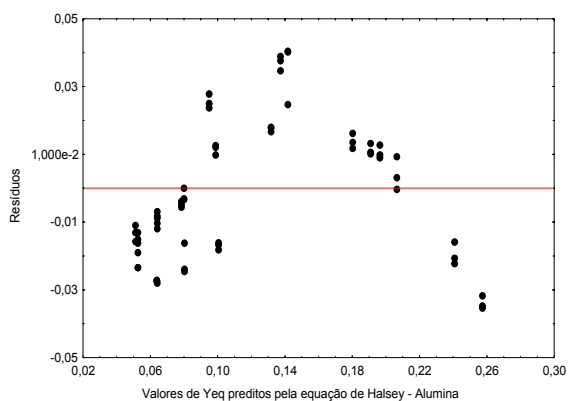


Figura C.17: Distribuição de resíduos em função dos valores de Yeq preditos pela equação de Halsey modificada. Alumina.

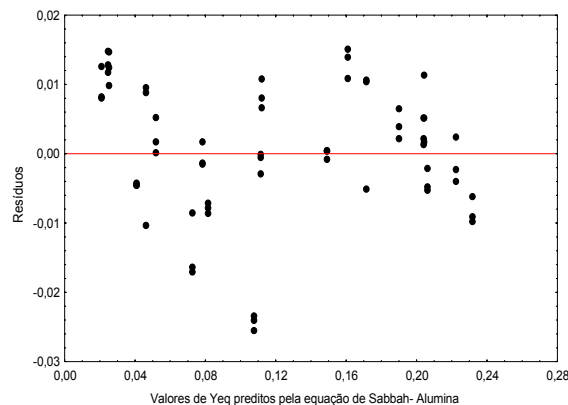


Figura C.18: Distribuição de resíduos em função dos valores de Yeq preditos pela equação de Sabbah. Alumina.

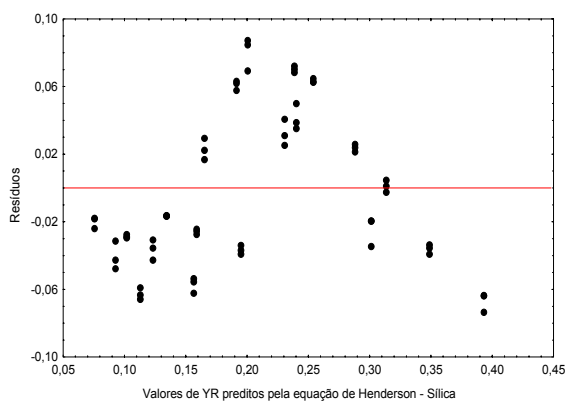


Figura C.19: Distribuição de resíduos em função dos valores de Yeq preditos pela equação de Henderson. Sílica-gel.

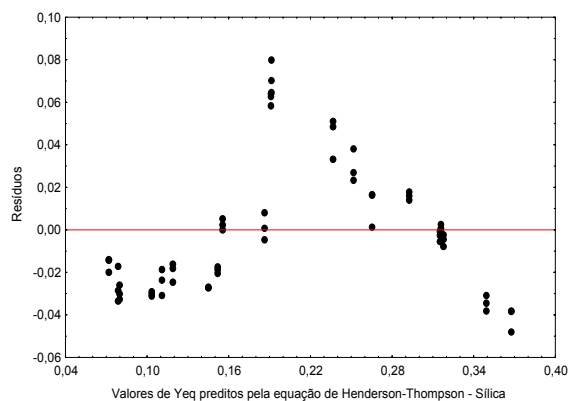


Figura C.20: Distribuição de resíduos em função dos valores de Yeq preditos pela equação de Henderson-Thompson. Sílica-gel.

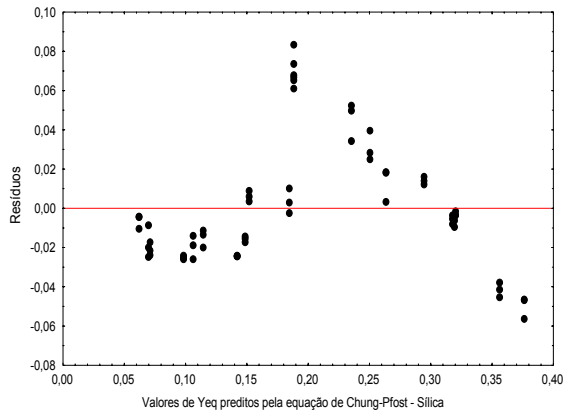


Figura C.21: Distribuição de resíduos em função dos valores de Yeq preditos pela equação de Chung-Pfost. Sílica-gel.

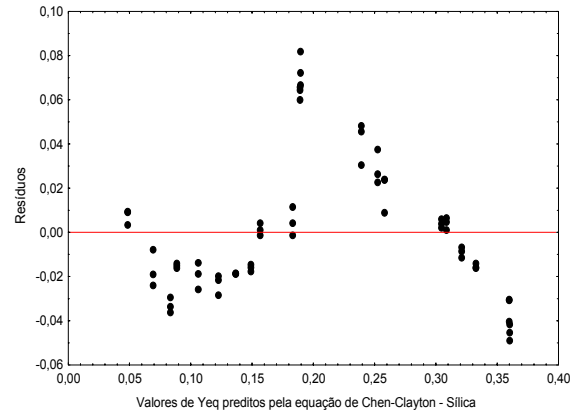


Figura C.22: Distribuição de resíduos em função dos valores de Yeq preditos pela equação de Chen-Clayton. Sílica-gel.

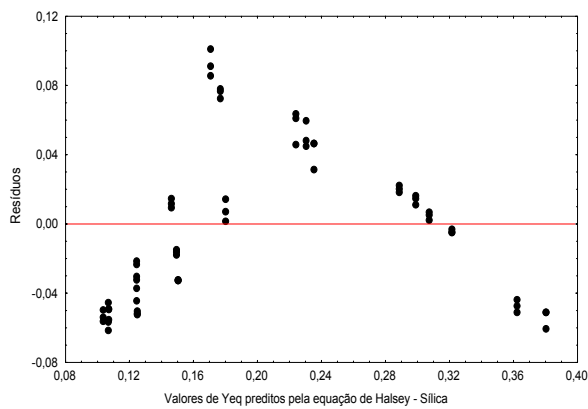


Figura C.23: Distribuição de resíduos em função dos valores de Yeq preditos pela equação de Halsey modificada. Sílica-gel.

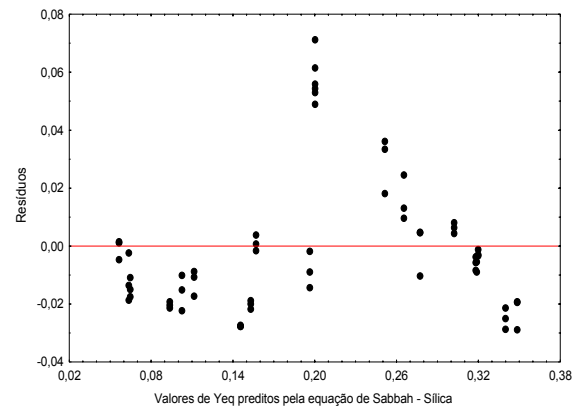


Figura C.24: Distribuição de resíduos em função dos valores de Yeq preditos pela equação de Sabbah. Sílica-gel.

APÊNDICE D

**DADOS EXPERIMENTAIS DA CINÉTICA DE SECAGEM DAS
PARTÍCULAS DE ALUMINA E SÍLICA-GEL**

Tabela D.1: Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de alumina e respectivas réplicas. $d_p = 3,095$ mm. $T_g = 100^\circ\text{C}$ $U = 0,5$ e $1,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.

t (min)	U (m/s)	YR (EXP)	Massa sólido (g)	Y_{eq} (b.s)
0	0,5	1,0000	17,32	0,0073
1	0,5	0,8228	17,32	0,0073
2	0,5	0,6767	17,32	0,0073
3	0,5	0,5241	17,32	0,0073
4	0,5	0,3896	17,32	0,0073
5	0,5	0,2714	17,32	0,0073
6	0,5	0,1746	17,32	0,0073
7	0,5	0,1007	17,32	0,0073
8	0,5	0,0466	17,32	0,0073
9	0,5	0,0072	17,32	0,0073
10	0,5	0,0039	17,32	0,0073
0	0,5	1,0000	17,69	0,0073
1	0,5	0,8393	17,69	0,0073
2	0,5	0,6835	17,69	0,0073
3	0,5	0,5439	17,69	0,0073
4	0,5	0,4092	17,69	0,0073
5	0,5	0,2907	17,69	0,0073
6	0,5	0,1917	17,69	0,0073
7	0,5	0,1090	17,69	0,0073
8	0,5	0,0570	17,69	0,0073
9	0,5	0,0197	17,69	0,0073
10	0,5	0,0051	17,69	0,0073
0	1,0	1,0000	15,90	0,0056
1	1,0	0,6426	15,90	0,0056
2	1,0	0,3974	15,90	0,0056
3	1,0	0,2225	15,90	0,0056
4	1,0	0,1370	15,90	0,0056
5	1,0	0,0857	15,90	0,0056
6	1,0	0,0476	15,90	0,0056
7	1,0	0,0343	15,90	0,0056
8	1,0	0,0267	15,90	0,0056
9	1,0	0,0172	15,90	0,0056
10	1,0	0,0134	15,90	0,0056
0	1,0	1,0000	17,39	0,0056
1	1,0	0,6537	17,39	0,0056
2	1,0	0,3928	17,39	0,0056
3	1,0	0,2306	17,39	0,0056
4	1,0	0,1364	17,39	0,0056
5	1,0	0,0838	17,39	0,0056
6	1,0	0,0531	17,39	0,0056
7	1,0	0,0377	17,39	0,0056
8	1,0	0,0268	17,39	0,0056
9	1,0	0,0202	17,39	0,0056
10	1,0	0,0136	17,39	0,0056

Tabela D.2: Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de alumina e respectivas réplicas. $d_p = 3,095$ mm. $T_g = 100^\circ\text{C}$
 $U = 1,5$ e $2,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.

t (min)	U (m/s)	YR (EXP)	Massa sólido (g)	Y_{eq} (b.s)
0	1,5	1,0000	17,53	0,0092
1	1,5	0,6331	17,53	0,0092
2	1,5	0,3800	17,53	0,0092
3	1,5	0,2421	17,53	0,0092
4	1,5	0,1725	17,53	0,0092
5	1,5	0,1283	17,53	0,0092
6	1,5	0,1055	17,53	0,0092
7	1,5	0,0908	17,53	0,0092
8	1,5	0,0881	17,53	0,0092
9	1,5	0,0774	17,53	0,0092
10	1,5	0,0761	17,53	0,0092
0	1,5	1,0000	16,32	0,0092
1	1,5	0,6038	16,32	0,0092
2	1,5	0,3504	16,32	0,0092
3	1,5	0,2076	16,32	0,0092
4	1,5	0,1339	16,32	0,0092
5	1,5	0,1030	16,32	0,0092
6	1,5	0,0809	16,32	0,0092
7	1,5	0,0706	16,32	0,0092
8	1,5	0,0662	16,32	0,0092
9	1,5	0,0617	16,32	0,0092
10	1,5	0,0588	16,32	0,0092
0	2,0	1,0000	16,95	0,0092
1	2,0	0,5061	16,95	0,0092
2	2,0	0,2700	16,95	0,0092
3	2,0	0,1535	16,95	0,0092
4	2,0	0,0981	16,95	0,0092
5	2,0	0,0675	16,95	0,0092
6	2,0	0,0515	16,95	0,0092
7	2,0	0,0413	16,95	0,0092
8	2,0	0,0340	16,95	0,0092
9	2,0	0,0311	16,95	0,0092
10	2,0	0,0282	16,95	0,0092
0	2,0	1,0000	17,79	0,0092
1	2,0	0,5527	17,79	0,0092
2	2,0	0,2889	17,79	0,0092
3	2,0	0,1485	17,79	0,0092
4	2,0	0,0839	17,79	0,0092
5	2,0	0,0538	17,79	0,0092
6	2,0	0,0381	17,79	0,0092
7	2,0	0,0295	17,79	0,0092
8	2,0	0,0237	17,79	0,0092
9	2,0	0,0209	17,79	0,0092
10	2,0	0,0166	17,79	0,0092

Tabela D.3: Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de alumina e respectivas réplicas. $d_p = 3,095$ mm. $T_g = 100^\circ\text{C}$
 $U = 2,5$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.

t (min)	U (m/s)	YR (EXP)	Massa sólido (g)	Y_{eq} (b.s)
0	2,5	1,0000	16,86	0,0051
1	2,5	0,4978	16,86	0,0051
2	2,5	0,2892	16,86	0,0051
3	2,5	0,1741	16,86	0,0051
4	2,5	0,1252	16,86	0,0051
5	2,5	0,1022	16,86	0,0051
6	2,5	0,0892	16,86	0,0051
7	2,5	0,0763	16,86	0,0051
8	2,5	0,0691	16,86	0,0051
9	2,5	0,0662	16,86	0,0051
10	2,5	0,0647	16,86	0,0051
0	2,5	1,0000	16,79	0,0051
1	2,5	0,4889	16,79	0,0051
2	2,5	0,2886	16,79	0,0051
3	2,5	0,1605	16,79	0,0051
4	2,5	0,1119	16,79	0,0051
5	2,5	0,0986	16,79	0,0051
6	2,5	0,0736	16,79	0,0051
7	2,5	0,0633	16,79	0,0051
8	2,5	0,0574	16,79	0,0051
9	2,5	0,0500	16,79	0,0051
10	2,5	0,0465	16,79	0,0051

Tabela D.4: Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de alumina e respectivas réplicas. $d_p = 3,095$ mm. $T_g = 80^\circ\text{C}$
 $U = 0,5$ e $1,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.

t (min)	U (m/s)	YR (EXP)	Massa sólido (g)	Y_{eq} (b.s)
0	0,5	1,0000	17,64	0,0137
1	0,5	0,8875	17,64	0,0137
2	0,5	0,7625	17,64	0,0137
3	0,5	0,6249	17,64	0,0137
4	0,5	0,5265	17,64	0,0137
5	0,5	0,4358	17,64	0,0137
6	0,5	0,3530	17,64	0,0137
7	0,5	0,2795	17,64	0,0137
8	0,5	0,2202	17,64	0,0137
9	0,5	0,1733	17,64	0,0137
10	0,5	0,1308	17,64	0,0137
0	0,5	1,0000	18,24	0,0137
1	0,5	0,8122	18,24	0,0137
2	0,5	0,6999	18,24	0,0137
3	0,5	0,6060	18,24	0,0137
4	0,5	0,5150	18,24	0,0137
5	0,5	0,4310	18,24	0,0137
6	0,5	0,3571	18,24	0,0137
7	0,5	0,2917	18,24	0,0137
8	0,5	0,2291	18,24	0,0137
9	0,5	0,1807	18,24	0,0137
10	0,5	0,1333	18,24	0,0137
0	1,0	1,0000	16,97	0,0137
1	1,0	0,7512	16,97	0,0137
2	1,0	0,5405	16,97	0,0137
3	1,0	0,3829	16,97	0,0137
4	1,0	0,2584	16,97	0,0137
5	1,0	0,1755	16,97	0,0137
6	1,0	0,1191	16,97	0,0137
7	1,0	0,0809	16,97	0,0137
8	1,0	0,0560	16,97	0,0137
9	1,0	0,0395	16,97	0,0137
10	1,0	0,0268	16,97	0,0137
0	1,0	1,0000	17,48	0,0137
1	1,0	0,7630	17,48	0,0137
2	1,0	0,5417	17,48	0,0137
3	1,0	0,3784	17,48	0,0137
4	1,0	0,2591	17,48	0,0137
5	1,0	0,1791	17,48	0,0137
6	1,0	0,1257	17,48	0,0137
7	1,0	0,0927	17,48	0,0137
8	1,0	0,0692	17,48	0,0137
9	1,0	0,0551	17,48	0,0137
10	1,0	0,0440	17,48	0,0137

Tabela D.5: Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de alumina e respectivas réplicas. $d_p = 3,095$ mm. $T_g = 80^\circ\text{C}$
 $U = 1,5$ e $2,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.

t (min)	U (m/s)	YR (EXP)	Massa sólido (g)	Y_{eq} (b.s)
0	1,5	1,0000	17,64	0,0137
1	1,5	0,6697	17,64	0,0137
2	1,5	0,4216	17,64	0,0137
3	1,5	0,2681	17,64	0,0137
4	1,5	0,1750	17,64	0,0137
5	1,5	0,1192	17,64	0,0137
6	1,5	0,0835	17,64	0,0137
7	1,5	0,0634	17,64	0,0137
8	1,5	0,0494	17,64	0,0137
9	1,5	0,0401	17,64	0,0137
10	1,5	0,0327	17,64	0,0137
0	1,5	1,0000	17,81	0,0137
1	1,5	0,6499	17,81	0,0137
2	1,5	0,4130	17,81	0,0137
3	1,5	0,2635	17,81	0,0137
4	1,5	0,1760	17,81	0,0137
5	1,5	0,1202	17,81	0,0137
6	1,5	0,0855	17,81	0,0137
7	1,5	0,0628	17,81	0,0137
8	1,5	0,0493	17,81	0,0137
9	1,5	0,0402	17,81	0,0137
10	1,5	0,0315	17,81	0,0137
0	2,0	1,0000	16,27	0,0137
1	2,0	0,5894	16,27	0,0137
2	2,0	0,3499	16,27	0,0137
3	2,0	0,2212	16,27	0,0137
4	2,0	0,1413	16,27	0,0137
5	2,0	0,0973	16,27	0,0137
6	2,0	0,0713	16,27	0,0137
7	2,0	0,0550	16,27	0,0137
8	2,0	0,0436	16,27	0,0137
9	2,0	0,0354	16,27	0,0137
10	2,0	0,0267	16,27	0,0137
0	2,0	1,0000	17,02	0,0137
1	2,0	0,5902	17,02	0,0137
2	2,0	0,3517	17,02	0,0137
3	2,0	0,2156	17,02	0,0137
4	2,0	0,1324	17,02	0,0137
5	2,0	0,0860	17,02	0,0137
6	2,0	0,0652	17,02	0,0137
7	2,0	0,0476	17,02	0,0137
8	2,0	0,0364	17,02	0,0137
9	2,0	0,0284	17,02	0,0137
10	2,0	0,0243	17,02	0,0137

Tabela D.6: Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de alumina e respectivas réplicas. $d_p = 3,095$ mm. $T_g = 80^\circ\text{C}$
 $U = 2,5$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.

t (min)	U (m/s)	YR (EXP)	Massa sólido (g)	Y_{eq} (b.s)
0	2,5	1,0000	17,11	0,0137
1	2,5	0,4948	17,11	0,0137
2	2,5	0,2746	17,11	0,0137
3	2,5	0,2050	17,11	0,0137
4	2,5	0,1418	17,11	0,0137
5	2,5	0,1014	17,11	0,0137
6	2,5	0,0819	17,11	0,0137
7	2,5	0,0398	17,11	0,0137
8	2,5	0,0333	17,11	0,0137
9	2,5	0,0236	17,11	0,0137
10	2,5	0,0188	17,11	0,0137
0	2,5	1,0000	16,80	0,0137
1	2,5	0,5242	16,80	0,0137
2	2,5	0,3274	16,80	0,0137
3	2,5	0,2032	16,80	0,0137
4	2,5	0,1500	16,80	0,0137
5	2,5	0,1162	16,80	0,0137
6	2,5	0,0903	16,80	0,0137
7	2,5	0,0403	16,80	0,0137
8	2,5	0,0274	16,80	0,0137
9	2,5	0,0242	16,80	0,0137
10	2,5	0,0210	16,80	0,0137

Tabela D.7: Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de alumina e respectivas réplicas. $d_p = 3,095$ mm. $T_g = 60^\circ\text{C}$
 $U = 0,5$ e $1,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.

t (min)	U (m/s)	YR (EXP)	Massa sólido (g)	Y_{eq} (b.s)
0	0,5	1,0000	17,38	0,0320
1	0,5	0,9259	17,38	0,0320
2	0,5	0,8325	17,38	0,0320
3	0,5	0,7553	17,38	0,0320
4	0,5	0,6782	17,38	0,0320
5	0,5	0,6071	17,38	0,0320
6	0,5	0,5433	17,38	0,0320
7	0,5	0,4840	17,38	0,0320
8	0,5	0,4321	17,38	0,0320
9	0,5	0,3787	17,38	0,0320
10	0,5	0,3313	17,38	0,0320
0	0,5	1,0000	17,15	0,0320
1	0,5	0,9272	17,15	0,0320
2	0,5	0,8410	17,15	0,0320
3	0,5	0,7504	17,15	0,0320
4	0,5	0,6925	17,15	0,0320
5	0,5	0,6197	17,15	0,0320
6	0,5	0,5529	17,15	0,0320
7	0,5	0,4994	17,15	0,0320
8	0,5	0,4400	17,15	0,0320
9	0,5	0,3924	17,15	0,0320
10	0,5	0,3508	17,15	0,0320
0	1,0	1,0000	15,89	0,0320
1	1,0	0,8137	15,89	0,0320
2	1,0	0,6585	15,89	0,0320
3	1,0	0,5374	15,89	0,0320
4	1,0	0,4381	15,89	0,0320
5	1,0	0,3729	15,89	0,0320
6	1,0	0,3232	15,89	0,0320
7	1,0	0,2782	15,89	0,0320
8	1,0	0,2363	15,89	0,0320
9	1,0	0,2254	15,89	0,0320
10	1,0	0,2052	15,89	0,0320
0	1,0	1,0000	15,66	0,0320
1	1,0	0,8238	15,66	0,0320
2	1,0	0,6873	15,66	0,0320
3	1,0	0,5523	15,66	0,0320
4	1,0	0,4603	15,66	0,0320
5	1,0	0,3666	15,66	0,0320
6	1,0	0,3190	15,66	0,0320
7	1,0	0,2745	15,66	0,0320
8	1,0	0,2428	15,66	0,0320
9	1,0	0,2190	15,66	0,0320
10	1,0	0,1999	15,66	0,0320

Tabela D.8: Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de alumina e respectivas réplicas. $d_p = 3,095$ mm. $T_g = 60^\circ\text{C}$
 $U = 1,5$ e $2,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.

t (min)	U (m/s)	YR (EXP)	Massa sólido (g)	Y_{eq} (b.s)
0	1,5	1,0000	16,09	0,0264
1	1,5	0,7344	16,09	0,0264
2	1,5	0,5272	16,09	0,0264
3	1,5	0,3935	16,09	0,0264
4	1,5	0,2983	16,09	0,0264
5	1,5	0,2415	16,09	0,0264
6	1,5	0,1947	16,09	0,0264
7	1,5	0,1713	16,09	0,0264
8	1,5	0,1412	16,09	0,0264
9	1,5	0,1245	16,09	0,0264
10	1,5	0,1145	16,09	0,0264
0	1,5	1,0000	17,20	0,0264
1	1,5	0,7559	17,20	0,0264
2	1,5	0,5528	17,20	0,0264
3	1,5	0,4315	17,20	0,0264
4	1,5	0,3420	17,20	0,0264
5	1,5	0,2753	17,20	0,0264
6	1,5	0,2298	17,20	0,0264
7	1,5	0,1950	17,20	0,0264
8	1,5	0,1692	17,20	0,0264
9	1,5	0,1525	17,20	0,0264
10	1,5	0,1374	17,20	0,0264
0	2,0	1,0000	17,20	0,0264
1	2,0	0,6532	17,20	0,0264
2	2,0	0,4750	17,20	0,0264
3	2,0	0,3669	17,20	0,0264
4	2,0	0,2873	17,20	0,0264
5	2,0	0,2141	17,20	0,0264
6	2,0	0,1760	17,20	0,0264
7	2,0	0,1473	17,20	0,0264
8	2,0	0,1298	17,20	0,0264
9	2,0	0,1075	17,20	0,0264
10	2,0	0,0948	17,20	0,0264
0	2,0	1,0000	16,21	0,0264
1	2,0	0,6340	16,21	0,0264
2	2,0	0,4147	16,21	0,0264
3	2,0	0,2791	16,21	0,0264
4	2,0	0,2587	16,21	0,0264
5	2,0	0,2085	16,21	0,0264
6	2,0	0,1732	16,21	0,0264
7	2,0	0,1360	16,21	0,0264
8	2,0	0,1193	16,21	0,0264
9	2,0	0,1100	16,21	0,0264
10	2,0	0,0877	16,21	0,0264

Tabela D.9: Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de alumina e respectivas réplicas. $d_p = 3,095$ mm. $T_g = 60^\circ\text{C}$
 $U = 2,5$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.

t (min)	U (m/s)	YR (EXP)	Massa sólido (g)	Y_{eq} (b.s)
0	2,5	1,0000	17,01	0,0388
1	2,5	0,5955	17,01	0,0388
2	2,5	0,3729	17,01	0,0388
3	2,5	0,2669	17,01	0,0388
4	2,5	0,1768	17,01	0,0388
5	2,5	0,1185	17,01	0,0388
6	2,5	0,0796	17,01	0,0388
7	2,5	0,0513	17,01	0,0388
8	2,5	0,0266	17,01	0,0388
9	2,5	0,0072	17,01	0,0388
10	2,5	0,0019	17,01	0,0388
0	2,5	1,0000	17,85	0,0388
1	2,5	0,6257	17,85	0,0388
2	2,5	0,4038	17,85	0,0388
3	2,5	0,2729	17,85	0,0388
4	2,5	0,1885	17,85	0,0388
5	2,5	0,1322	17,85	0,0388
6	2,5	0,0659	17,85	0,0388
7	2,5	0,0394	17,85	0,0388
8	2,5	0,0311	17,85	0,0388
9	2,5	0,0196	17,85	0,0388
10	2,5	0,0030	17,85	0,0388

Tabela D.10: Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de sílica-gel e respectivas réplicas. $d_p = 2,595$ mm.
 $T_g = 100^\circ\text{C}$ – $U = 0,5$ e $1,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.

t (min)	U (m/s)	YR (EXP)	Massa sólido (g)	Y_{eq} (b.s)
0	0,5	1,0000	17,06	0,0261
1	0,5	0,8749	17,06	0,0261
2	0,5	0,7404	17,06	0,0261
3	0,5	0,6152	17,06	0,0261
4	0,5	0,5032	17,06	0,0261
5	0,5	0,3706	17,06	0,0261
6	0,5	0,2641	17,06	0,0261
7	0,5	0,1801	17,06	0,0261
8	0,5	0,0997	17,06	0,0261
9	0,5	0,0418	17,06	0,0261
10	0,5	0,0120	17,06	0,0261
0	0,5	1,0000	16,83	0,0261
1	0,5	0,8864	16,83	0,0261
2	0,5	0,7443	16,83	0,0261
3	0,5	0,6004	16,83	0,0261
4	0,5	0,4943	16,83	0,0261
5	0,5	0,3599	16,83	0,0261
6	0,5	0,2671	16,83	0,0261
7	0,5	0,1610	16,83	0,0261
8	0,5	0,1004	16,83	0,0261
9	0,5	0,0587	16,83	0,0261
10	0,5	0,0152	16,83	0,0261
0	1,0	1,0000	15,30	0,0210
1	1,0	0,6981	15,30	0,0210
2	1,0	0,4515	15,30	0,0210
3	1,0	0,2699	15,30	0,0210
4	1,0	0,1575	15,30	0,0210
5	1,0	0,0943	15,30	0,0210
6	1,0	0,0588	15,30	0,0210
7	1,0	0,0391	15,30	0,0210
8	1,0	0,0253	15,30	0,0210
9	1,0	0,0194	15,30	0,0210
10	1,0	0,0134	15,30	0,0210
0	1,0	1,0000	15,24	0,0210
1	1,0	0,6948	15,24	0,0210
2	1,0	0,4468	15,24	0,0210
3	1,0	0,2676	15,24	0,0210
4	1,0	0,1534	15,24	0,0210
5	1,0	0,0904	15,24	0,0210
6	1,0	0,0570	15,24	0,0210
7	1,0	0,0373	15,24	0,0210
8	1,0	0,0255	15,24	0,0210
9	1,0	0,0156	15,24	0,0210
10	1,0	0,0137	15,24	0,0210

Tabela D.11: Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de sílica-gel e respectivas réplicas. $d_p = 2,595$ mm.
 $T_g = 100^\circ\text{C}$ – $U = 1,5$ e $2,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.

t (min)	U (m/s)	YR (EXP)	Massa sólido (g)	Y_{eq} (b.s)
0	1,5	1,0000	16,01	0,0261
1	1,5	0,6293	16,01	0,0261
2	1,5	0,3677	16,01	0,0261
3	1,5	0,2121	16,01	0,0261
4	1,5	0,1270	16,01	0,0261
5	1,5	0,0741	16,01	0,0261
6	1,5	0,0516	16,01	0,0261
7	1,5	0,0452	16,01	0,0261
8	1,5	0,0404	16,01	0,0261
9	1,5	0,0275	16,01	0,0261
10	1,5	0,0147	16,01	0,0261
0	1,5	1,0000	15,99	0,0261
1	1,5	0,6301	15,99	0,0261
2	1,5	0,3867	15,99	0,0261
3	1,5	0,2223	15,99	0,0261
4	1,5	0,1088	15,99	0,0261
5	1,5	0,0710	15,99	0,0261
6	1,5	0,0447	15,99	0,0261
7	1,5	0,0381	15,99	0,0261
8	1,5	0,0234	15,99	0,0261
9	1,5	0,0201	15,99	0,0261
10	1,5	0,0168	15,99	0,0261
0	2,0	1,0000	15,94	0,0261
1	2,0	0,5337	15,94	0,0261
2	2,0	0,2780	15,94	0,0261
3	2,0	0,1409	15,94	0,0261
4	2,0	0,0841	15,94	0,0261
5	2,0	0,0474	15,94	0,0261
6	2,0	0,0290	15,94	0,0261
7	2,0	0,0173	15,94	0,0261
8	2,0	0,0106	15,94	0,0261
9	2,0	0,0055	15,94	0,0261
10	2,0	0,0022	15,94	0,0261
0	2,0	1,0000	15,38	0,0261
1	2,0	0,5042	15,38	0,0261
2	2,0	0,2475	15,38	0,0261
3	2,0	0,1280	15,38	0,0261
4	2,0	0,0717	15,38	0,0261
5	2,0	0,0418	15,38	0,0261
6	2,0	0,0278	15,38	0,0261
7	2,0	0,0137	15,38	0,0261
8	2,0	0,0084	15,38	0,0261
9	2,0	0,0049	15,38	0,0261
10	2,0	0,0014	15,38	0,0261

Tabela D.12: Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de sílica-gel e respectivas réplicas. $d_p = 2,595$ mm.
 $T_g = 100^\circ\text{C} - U = 2,5$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.

t (min)	U (m/s)	YR (EXP)	Massa sólido (g)	Y_{eq} (b.s)
0	2,5	1,0000	15,87	0,0261
1	2,5	0,4693	15,87	0,0261
2	2,5	0,2313	15,87	0,0261
3	2,5	0,1312	15,87	0,0261
4	2,5	0,0705	15,87	0,0261
5	2,5	0,0482	15,87	0,0261
6	2,5	0,0387	15,87	0,0261
7	2,5	0,0235	15,87	0,0261
8	2,5	0,0175	15,87	0,0261
9	2,5	0,0114	15,87	0,0261
10	2,5	0,0053	15,87	0,0261
0	2,5	1,0000	15,42	0,0261
1	2,5	0,4641	15,42	0,0261
2	2,5	0,2086	15,42	0,0261
3	2,5	0,1148	15,42	0,0261
4	2,5	0,0673	15,42	0,0261
5	2,5	0,0436	15,42	0,0261
6	2,5	0,0266	15,42	0,0261
7	2,5	0,0164	15,42	0,0261
8	2,5	0,0097	15,42	0,0261
9	2,5	0,0046	15,42	0,0261
10	2,5	0,0012	15,42	0,0261

Tabela D.13: Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de sílica-gel e respectivas réplicas. $d_p = 2,595$ mm.
 $T_g = 80^\circ\text{C}$ – $U = 0,5$ e $1,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.

t (min)	U (m/s)	YR (EXP)	Massa sólido (g)	Y_{eq} (b.s)
0	0,5	1,0000	17,60	0,0404
1	0,5	0,8736	17,60	0,0404
2	0,5	0,7679	17,60	0,0404
3	0,5	0,7131	17,60	0,0404
4	0,5	0,6056	17,60	0,0404
5	0,5	0,5150	17,60	0,0404
6	0,5	0,4093	17,60	0,0404
7	0,5	0,3357	17,60	0,0404
8	0,5	0,2621	17,60	0,0404
9	0,5	0,1961	17,60	0,0404
10	0,5	0,1413	17,60	0,0404
0	0,5	1,0000	17,36	0,0404
1	0,5	0,8773	17,36	0,0404
2	0,5	0,7899	17,36	0,0404
3	0,5	0,6653	17,36	0,0404
4	0,5	0,5761	17,36	0,0404
5	0,5	0,4850	17,36	0,0404
6	0,5	0,4088	17,36	0,0404
7	0,5	0,3604	17,36	0,0404
8	0,5	0,2582	17,36	0,0404
9	0,5	0,2042	17,36	0,0404
10	0,5	0,1522	17,36	0,0404
0	1,0	1,0000	16,62	0,0404
1	1,0	0,7522	16,62	0,0404
2	1,0	0,5536	16,62	0,0404
3	1,0	0,3878	16,62	0,0404
4	1,0	0,2603	16,62	0,0404
5	1,0	0,1673	16,62	0,0404
6	1,0	0,1036	16,62	0,0404
7	1,0	0,0635	16,62	0,0404
8	1,0	0,0471	16,62	0,0404
9	1,0	0,0234	16,62	0,0404
10	1,0	0,0125	16,62	0,0404
0	1,0	1,0000	16,47	0,0404
1	1,0	0,7716	16,47	0,0404
2	1,0	0,5469	16,47	0,0404
3	1,0	0,3797	16,47	0,0404
4	1,0	0,2478	16,47	0,0404
5	1,0	0,1624	16,47	0,0404
6	1,0	0,1030	16,47	0,0404
7	1,0	0,0603	16,47	0,0404
8	1,0	0,0398	16,47	0,0404
9	1,0	0,0250	16,47	0,0404
10	1,0	0,0120	16,47	0,0404

Tabela D.14: Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de sílica-gel e respectivas réplicas. $d_p = 2,595$ mm.
 $T_g = 80^\circ\text{C}$ – $U = 1,5$ e $2,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.

t (min)	U (m/s)	YR (EXP)	Massa sólido (g)	Y_{eq} (b.s)
0	1,5	1,0000	15,86	0,0404
1	1,5	0,6722	15,86	0,0404
2	1,5	0,4295	15,86	0,0404
3	1,5	0,2666	15,86	0,0404
4	1,5	0,1647	15,86	0,0404
5	1,5	0,1110	15,86	0,0404
6	1,5	0,0665	15,86	0,0404
7	1,5	0,0443	15,86	0,0404
8	1,5	0,0313	15,86	0,0404
9	1,5	0,0258	15,86	0,0404
10	1,5	0,0184	15,86	0,0404
0	1,5	1,0000	16,38	0,0404
1	1,5	0,6635	16,38	0,0404
2	1,5	0,4234	16,38	0,0404
3	1,5	0,2652	16,38	0,0404
4	1,5	0,1597	16,38	0,0404
5	1,5	0,1033	16,38	0,0404
6	1,5	0,0651	16,38	0,0404
7	1,5	0,0470	16,38	0,0404
8	1,5	0,0324	16,38	0,0404
9	1,5	0,0233	16,38	0,0404
10	1,5	0,0197	16,38	0,0404
0	2,0	1,0000	16,25	0,0404
1	2,0	0,5985	16,25	0,0404
2	2,0	0,3522	16,25	0,0404
3	2,0	0,2023	16,25	0,0404
4	2,0	0,1166	16,25	0,0404
5	2,0	0,0720	16,25	0,0404
6	2,0	0,0452	16,25	0,0404
7	2,0	0,0345	16,25	0,0404
8	2,0	0,0202	16,25	0,0404
9	2,0	0,0149	16,25	0,0404
10	2,0	0,0113	16,25	0,0404
0	2,0	1,0000	16,01	0,0404
1	2,0	0,5809	16,01	0,0404
2	2,0	0,3399	16,01	0,0404
3	2,0	0,2027	16,01	0,0404
4	2,0	0,1155	16,01	0,0404
5	2,0	0,0710	16,01	0,0404
6	2,0	0,0488	16,01	0,0404
7	2,0	0,0377	16,01	0,0404
8	2,0	0,0284	16,01	0,0404
9	2,0	0,0210	16,01	0,0404
10	2,0	0,0154	16,01	0,0404

Tabela D.15: Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de sílica-gel e respectivas réplicas. $d_p = 2,595$ mm.
 $T_g = 80^\circ\text{C}$ – $U = 2,5$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.

t (min)	U (m/s)	YR (EXP)	Massa sólido (g)	Y_{eq} (b.s)
0	2,5	1,0000	16,14	0,0404
1	2,5	0,5217	16,14	0,0404
2	2,5	0,2834	16,14	0,0404
3	2,5	0,1573	16,14	0,0404
4	2,5	0,0890	16,14	0,0404
5	2,5	0,0907	16,14	0,0404
6	2,5	0,0347	16,14	0,0404
7	2,5	0,0206	16,14	0,0404
8	2,5	0,0171	16,14	0,0404
9	2,5	0,0119	16,14	0,0404
10	2,5	0,0049	16,14	0,0404
0	2,5	1,0000	15,89	0,0404
1	2,5	0,5179	15,89	0,0404
2	2,5	0,2787	15,89	0,0404
3	2,5	0,1519	15,89	0,0404
4	2,5	0,0884	15,89	0,0404
5	2,5	0,0540	15,89	0,0404
6	2,5	0,0323	15,89	0,0404
7	2,5	0,0214	15,89	0,0404
8	2,5	0,0123	15,89	0,0404
9	2,5	0,0069	15,89	0,0404
10	2,5	0,0014	15,89	0,0404

Tabela D.16: Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de sílica-gel e respectivas réplicas. $d_p = 2,595$ mm.
 $T_g = 60^\circ\text{C}$ – $U = 0,5$ e $1,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.

t (min)	U (m/s)	YR (EXP)	Massa sólido (g)	Y_{eq} (b.s)
0	0,5	1,0000	16,90	0,0584
1	0,5	0,9378	16,90	0,0584
2	0,5	0,8255	16,90	0,0584
3	0,5	0,7585	16,90	0,0584
4	0,5	0,6725	16,90	0,0584
5	0,5	0,5744	16,90	0,0584
6	0,5	0,5003	16,90	0,0584
7	0,5	0,4597	16,90	0,0584
8	0,5	0,3736	16,90	0,0584
9	0,5	0,3210	16,90	0,0584
10	0,5	0,2684	16,90	0,0584
0	0,5	1,0000	15,84	0,0584
1	0,5	0,9032	15,84	0,0584
2	0,5	0,8087	15,84	0,0584
3	0,5	0,7284	15,84	0,0584
4	0,5	0,6576	15,84	0,0584
5	0,5	0,5844	15,84	0,0584
6	0,5	0,5159	15,84	0,0584
7	0,5	0,4474	15,84	0,0584
8	0,5	0,3955	15,84	0,0584
9	0,5	0,3364	15,84	0,0584
10	0,5	0,2868	15,84	0,0584
0	1,0	1,0000	16,13	0,0584
1	1,0	0,8322	16,13	0,0584
2	1,0	0,6970	16,13	0,0584
3	1,0	0,5684	16,13	0,0584
4	1,0	0,4572	16,13	0,0584
5	1,0	0,3482	16,13	0,0584
6	1,0	0,2676	16,13	0,0584
7	1,0	0,2371	16,13	0,0584
8	1,0	0,1477	16,13	0,0584
9	1,0	0,1019	16,13	0,0584
10	1,0	0,0714	16,13	0,0584
0	1,0	1,0000	16,19	0,0584
1	1,0	0,7826	16,19	0,0584
2	1,0	0,6816	16,19	0,0584
3	1,0	0,5345	16,19	0,0584
4	1,0	0,4005	16,19	0,0584
5	1,0	0,2929	16,19	0,0584
6	1,0	0,2117	16,19	0,0584
7	1,0	0,1458	16,19	0,0584
8	1,0	0,0997	16,19	0,0584
9	1,0	0,0668	16,19	0,0584
10	1,0	0,0382	16,19	0,0584

Tabela D.17: Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de sílica-gel e respectivas réplicas. $d_p = 2,595$ mm.
 $T_g = 60^\circ\text{C}$ – $U = 1,5$ e $2,0$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.

t (min)	U (m/s)	YR (EXP)	Massa sólido (g)	Y_{eq} (b.s)
0	1,5	1,0000	16,93	0,0584
1	1,5	0,7718	16,93	0,0584
2	1,5	0,5779	16,93	0,0584
3	1,5	0,4243	16,93	0,0584
4	1,5	0,2769	16,93	0,0584
5	1,5	0,1840	16,93	0,0584
6	1,5	0,1092	16,93	0,0584
7	1,5	0,0608	16,93	0,0584
8	1,5	0,0466	16,93	0,0584
9	1,5	0,0184	16,93	0,0584
10	1,5	0,0083	16,93	0,0584
0	1,5	1,0000	16,53	0,0584
1	1,5	0,7727	16,53	0,0584
2	1,5	0,5755	16,53	0,0584
3	1,5	0,4147	16,53	0,0584
4	1,5	0,2989	16,53	0,0584
5	1,5	0,1917	16,53	0,0584
6	1,5	0,1295	16,53	0,0584
7	1,5	0,0652	16,53	0,0584
8	1,5	0,0395	16,53	0,0584
9	1,5	0,0202	16,53	0,0584
10	1,5	0,0138	16,53	0,0584
0	2,0	1,0000	16,25	0,0584
1	2,0	0,7149	16,25	0,0584
2	2,0	0,5164	16,25	0,0584
3	2,0	0,2968	16,25	0,0584
4	2,0	0,1966	16,25	0,0584
5	2,0	0,1196	16,25	0,0584
6	2,0	0,0772	16,25	0,0584
7	2,0	0,0464	16,25	0,0584
8	2,0	0,0194	16,25	0,0584
9	2,0	0,0155	16,25	0,0584
10	2,0	0,0117	16,25	0,0584
0	2,0	1,0000	16,13	0,0584
1	2,0	0,6994	16,13	0,0584
2	2,0	0,4606	16,13	0,0584
3	2,0	0,3330	16,13	0,0584
4	2,0	0,2177	16,13	0,0584
5	2,0	0,1642	16,13	0,0584
6	2,0	0,1004	16,13	0,0584
7	2,0	0,0654	16,13	0,0584
8	2,0	0,0345	16,13	0,0584
9	2,0	0,0180	16,13	0,0584
10	2,0	0,0119	16,13	0,0584

Tabela D.18: Dados experimentais de cinética de secagem em leito fixo para as partículas de sílica-gel e respectivas réplicas. $d_p = 2,595$ mm.
 $T_g = 60^\circ\text{C}$ – $U = 2,5$ m/s, $Y_0 = 1,00$ (b.s) - $V = 21,65$ cm³.

t (min)	U (m/s)	YR (EXP)	Massa sólido (g)	Y_{eq} (b.s)
0	2,5	1,0000	16,92	0,0584
1	2,5	0,6759	16,92	0,0584
2	2,5	0,4363	16,92	0,0584
3	2,5	0,2910	16,92	0,0584
4	2,5	0,2006	16,92	0,0584
5	2,5	0,1240	16,92	0,0584
6	2,5	0,0690	16,92	0,0584
7	2,5	0,0572	16,92	0,0584
8	2,5	0,0356	16,92	0,0584
9	2,5	0,0219	16,92	0,0584
10	2,5	0,0121	16,92	0,0584
0	2,5	1,0000	16,46	0,0584
1	2,5	0,7079	16,46	0,0584
2	2,5	0,4338	16,46	0,0584
3	2,5	0,3098	16,46	0,0584
4	2,5	0,1957	16,46	0,0584
5	2,5	0,1097	16,46	0,0584
6	2,5	0,0637	16,46	0,0584
7	2,5	0,0417	16,46	0,0584
8	2,5	0,0337	16,46	0,0584
9	2,5	0,0257	16,46	0,0584
10	2,5	0,0157	16,46	0,0584

APÊNDICE E

DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE RESÍDUOS E DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS PARA AS PARTÍCULAS DE ALUMINA E SÍLICA-GEL REFERENTES ÀS EQUAÇÕES DE CINÉTICA DE SECAGEM NO LEITO FIXO

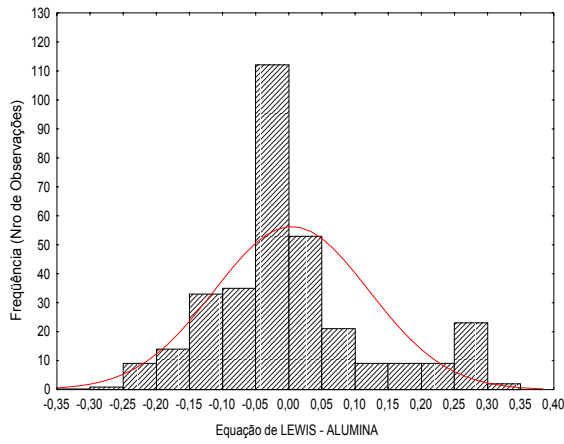


Figura E.1: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Lewis. Alumina.

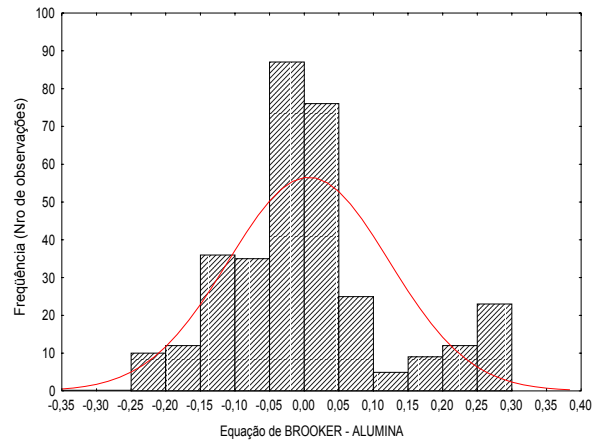


Figura E.2: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Brooker. Alumina.

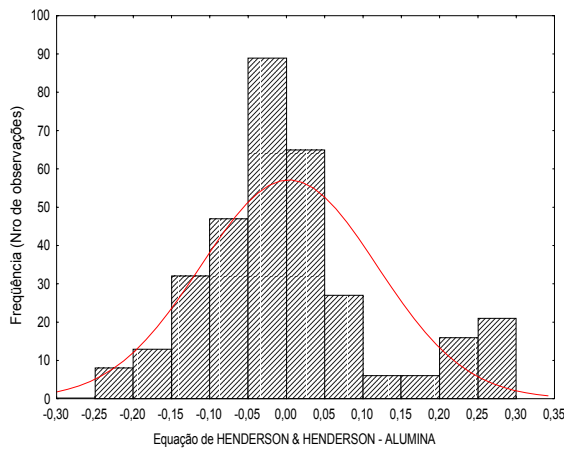


Figura E.3: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Henderson e Henderson. Alumina.

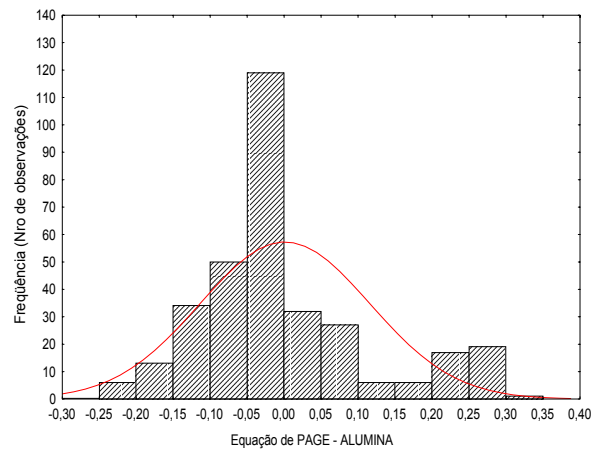


Figura E.4: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Page. Alumina.

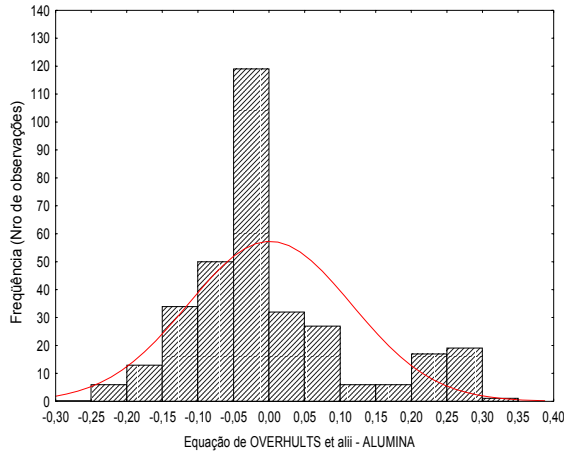


Figura E.5: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Overhults. Alumina.

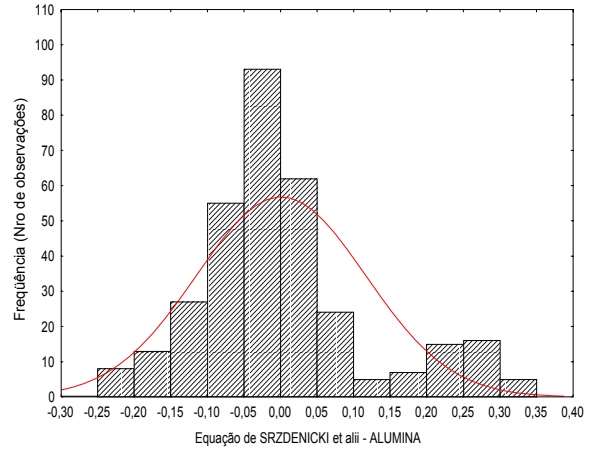


Figura E.6: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Srzdenicki. Alumina.

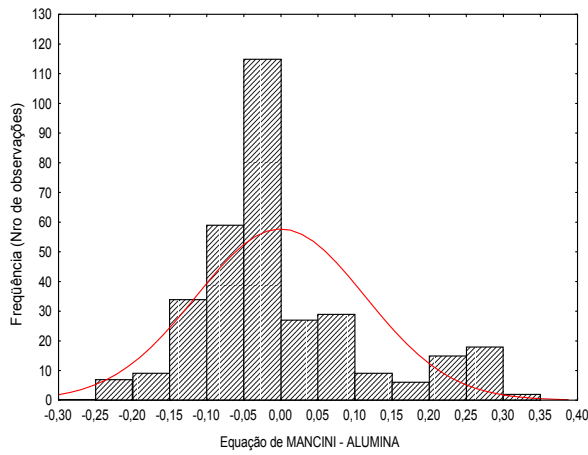


Figura E.7: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Mancini. Alumina.

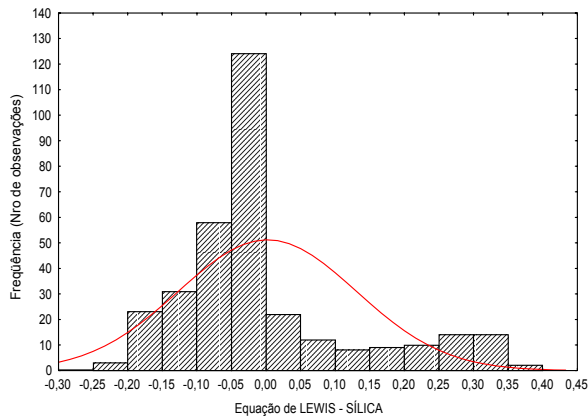


Figura E.8: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Lewis. Sílica-gel.

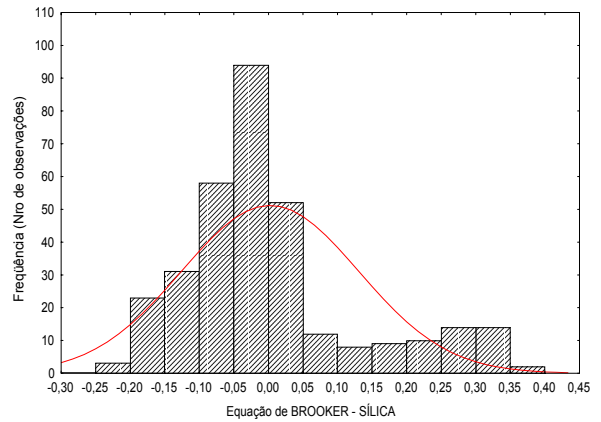


Figura E.9: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Brooker. Sílica-gel.

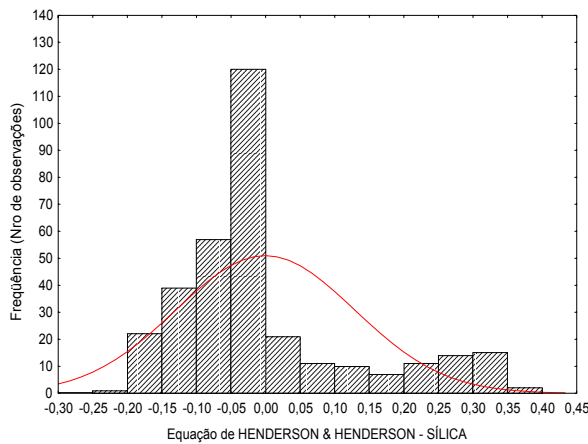


Figura E.10: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Henderson e Henderson. Sílica-gel.

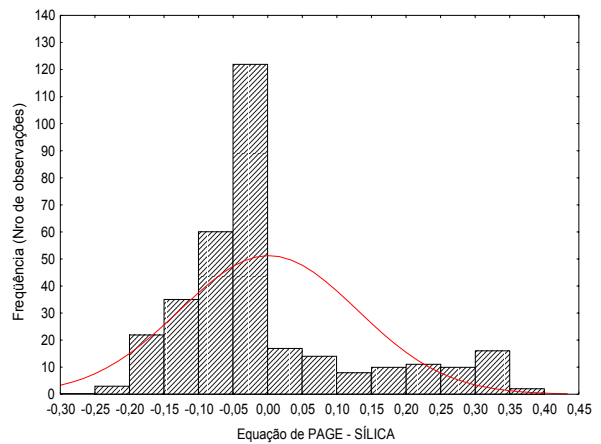


Figura E.11: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Page. Sílica-gel.

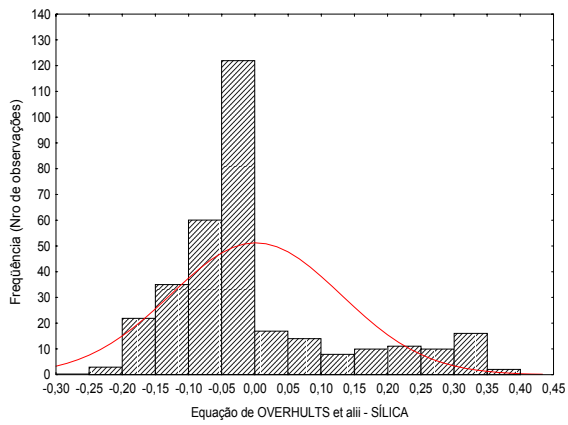


Figura E.12: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Overhults. Sílica-gel.

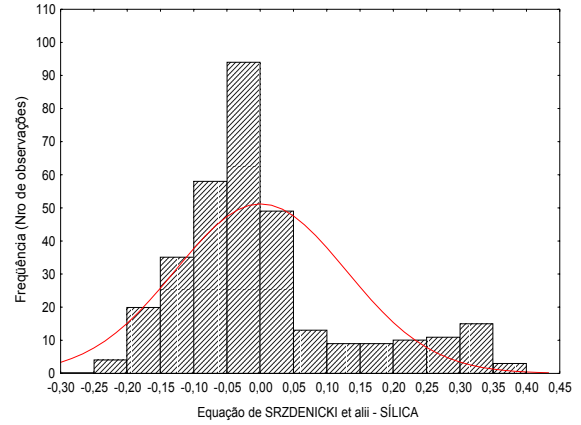


Figura E.13: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Srzdenicki. Sílica-gel.

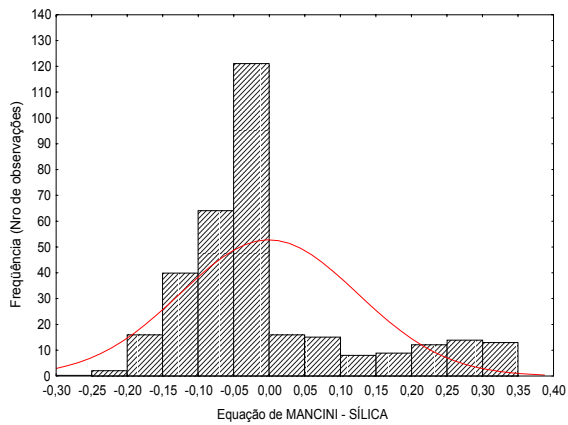


Figura E.14: Distribuição de frequência de resíduos determinados para a equação de Mancini. Sílica-gel.

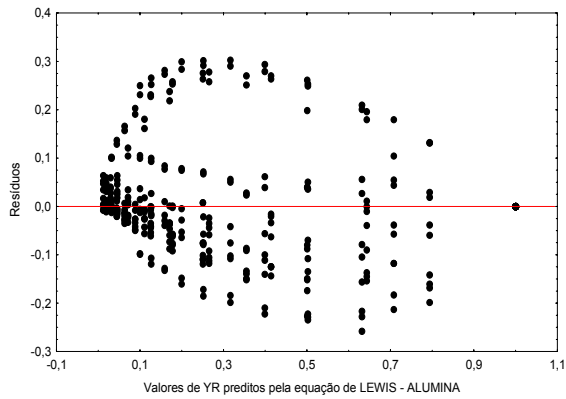


Figura E.15: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Lewis. Alumina.

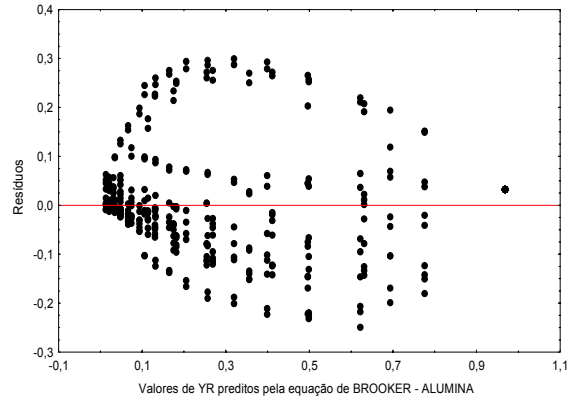


Figura E.16: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Brooker. Alumina.

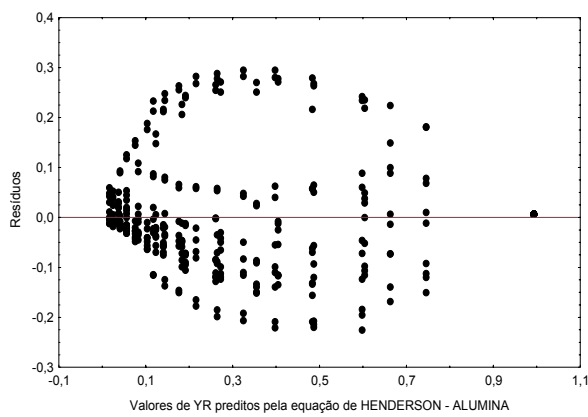


Figura E.17: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Henderson e Henderson Alumina.

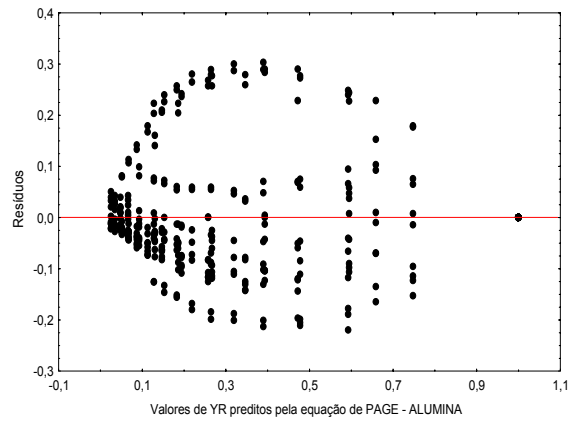


Figura E.18: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Page. Alumina.

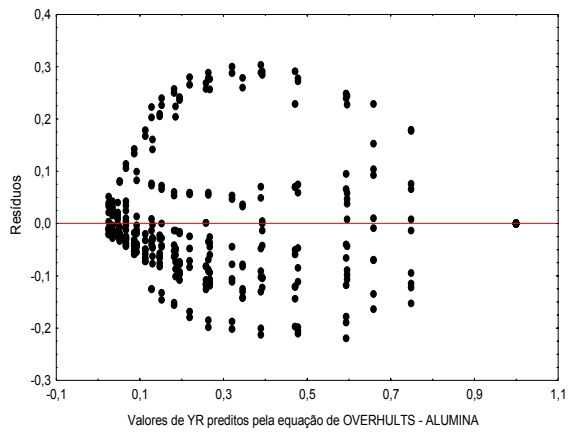


Figura E.19: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Overhults. Alumina.

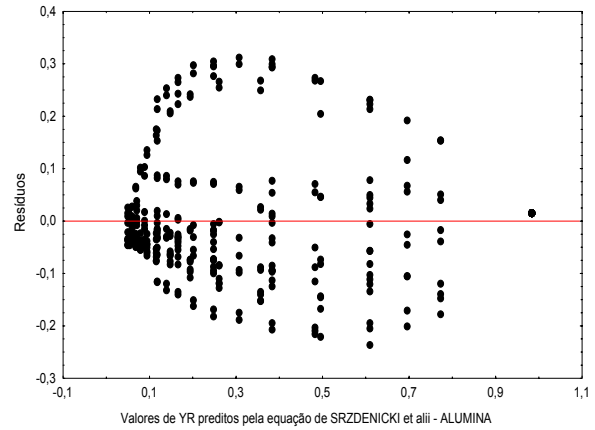


Figura E.20: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Srzdenicki. Alumina.

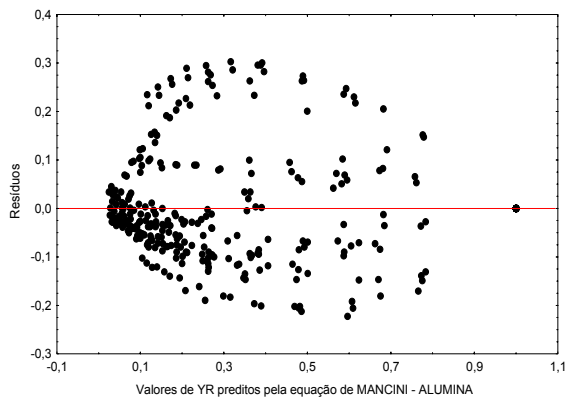


Figura E.21: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Mancini. Alumina.

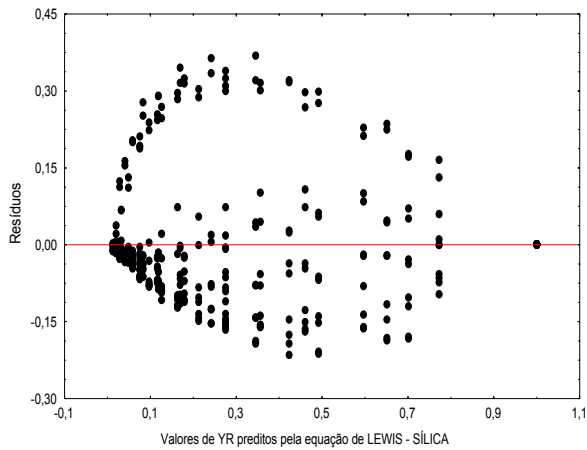


Figura E.22: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Lewis. Sílica-gel.

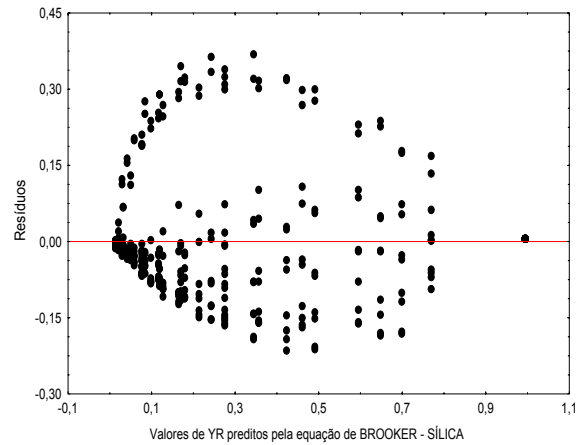


Figura E.23: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Brooker. Sílica-gel.

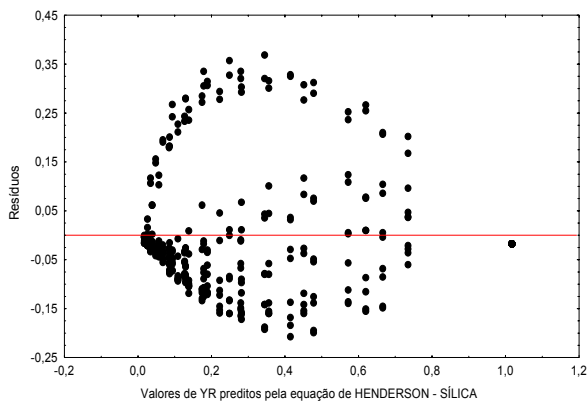


Figura E.24: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Henderson e Henderson Sílica-gel.

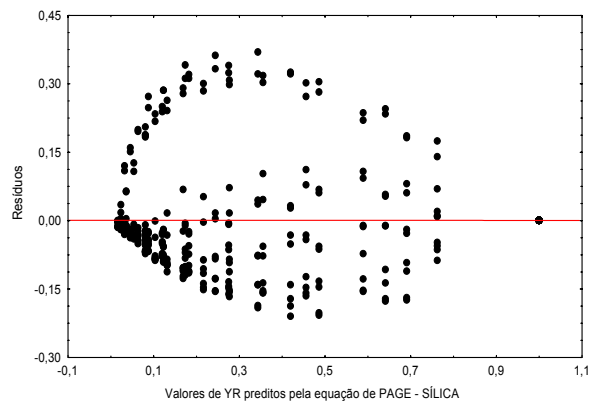


Figura E.25: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Page. Sílica-gel.

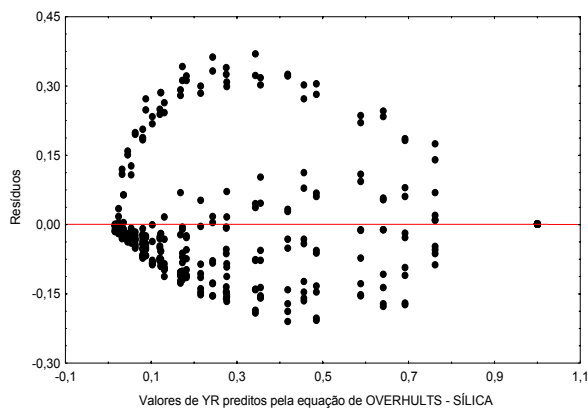


Figura E.26: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Overhults. Sílica-gel.

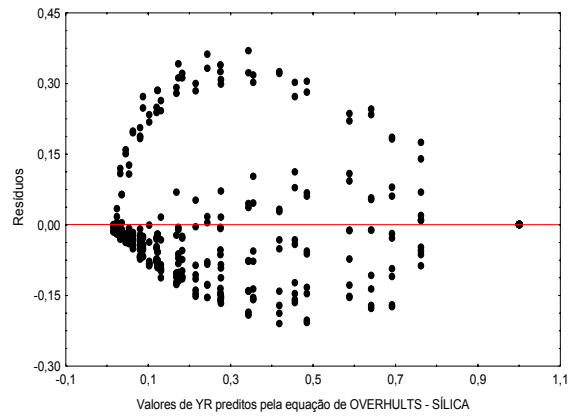


Figura E.27: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Srzdenicki. Sílica-gel.

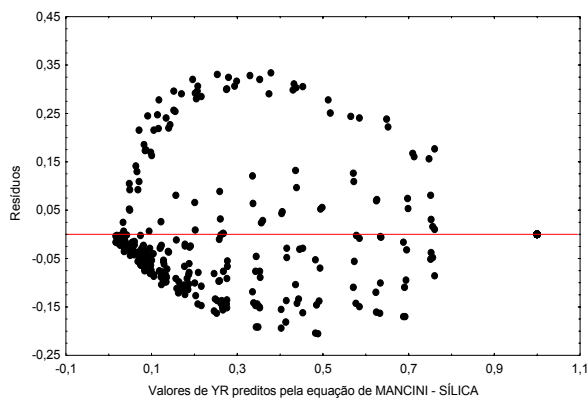


Figura E.28: Distribuição de resíduos em função dos valores de YR preditos pela equação de Mancini. Sílica-gel.

APÊNDICE F

**DADOS EXPERIMENTAIS DA CINÉTICA DE SECAGEM DAS
PARTÍCULAS DE ALUMINA E SÍLICA-GEL NOS LEITOS FLUIDIZADO
E VIBRO-FLUIDIZADO**

Tabela F.1: Dados experimentais de tempo, umidade e temperatura dos sólidos e temperatura do ar para as partículas de alumina. $\Gamma = 0,0$ - $T_{gb} = 70^{\circ}\text{C}$
 $Y_{eq} = 0,003$ (b.s)

t (min)	Y_s (b.s)	YR	T_s ($^{\circ}\text{C}$)	T_{g2} ($^{\circ}\text{C}$)
0	0,3710	1,0000	27,80	70,00
5	0,2652	0,7124	32,10	36,40
10	0,1849	0,4944	34,20	40,40
15	0,1306	0,3467	36,10	47,10
20	0,0773	0,2018	39,70	54,40
25	0,0597	0,1540	42,30	58,90
30	0,0470	0,1196	43,30	62,90
35	0,0397	0,0996	44,90	65,20
40	0,0360	0,0898	46,70	66,60
45	0,0351	0,0873	46,80	67,30
50	0,0330	0,0814	46,90	67,60
55	0,0315	0,0775	46,90	67,90
60	0,0314	0,0771	47,70	68,30

Tabela F.2: Dados experimentais de tempo, umidade e temperatura dos sólidos e temperatura do ar para as partículas de alumina. $\Gamma = 0,5$ - $T_{gb} = 70^{\circ}\text{C}$
 $Y_{eq} = 0,003$ (b.s)

t (min)	Y_s (b.s)	YR	T_s ($^{\circ}\text{C}$)	T_{g2} ($^{\circ}\text{C}$)
0	0,4030	1,0000	29,20	70,00
5	0,2853	0,7057	32,30	36,00
10	0,2159	0,5322	33,20	39,90
15	0,1451	0,3552	35,90	45,00
20	0,1037	0,2518	38,10	50,00
25	0,0735	0,1761	40,70	55,10
30	0,0515	0,1211	44,20	61,60
35	0,0421	0,0979	46,70	65,10
40	0,0368	0,0844	47,60	66,90
45	0,0336	0,0765	48,20	67,60
50	0,0319	0,0723	48,40	68,20
55	0,0312	0,0704	48,60	68,40
60	0,0311	0,0702	48,70	68,70

Tabela F.3: Dados experimentais de tempo, umidade e temperatura dos sólidos e temperatura do ar para as partículas de alumina. $\Gamma = 1,0$ - $T_{gb} = 70^{\circ}\text{C}$
 $Y_{eq} = 0,003$ (b.s)

t (min)	Y_s (b.s)	YR	T_s ($^{\circ}\text{C}$)	T_{g2} ($^{\circ}\text{C}$)
0	0,4000	1,0000	26,20	70,00
5	0,3085	0,7694	29,60	31,60
10	0,2289	0,5690	32,10	35,80
15	0,1607	0,3973	35,10	42,00
20	0,0993	0,2427	37,80	48,80
25	0,0689	0,1661	41,30	55,40
30	0,0506	0,1200	43,80	60,40
35	0,0414	0,0967	45,90	64,10
40	0,0360	0,0832	47,60	66,10
45	0,0349	0,0804	47,90	67,10
50	0,0308	0,0701	48,40	67,60
55	0,0307	0,0697	48,80	67,80
60	0,0305	0,0692	49,20	67,90

Tabela F.4: Dados experimentais de tempo, umidade e temperatura dos sólidos e temperatura do ar para as partículas de alumina. $\Gamma = 1,5$ - $T_{gb} = 70^{\circ}\text{C}$
 $Y_{eq} = 0,003$ (b.s)

t (min)	Y_s (b.s)	YR	T_s ($^{\circ}\text{C}$)	T_{g2} ($^{\circ}\text{C}$)
0	0,3774	1,0000	28,80	70,00
5	0,2872	0,7592	31,50	33,00
10	0,2122	0,5587	33,30	37,40
15	0,1383	0,3613	35,80	43,80
20	0,0894	0,2309	39,50	49,90
25	0,0639	0,1628	42,40	55,80
30	0,0471	0,1177	44,60	60,50
35	0,0378	0,0930	46,50	63,60
40	0,0332	0,0806	48,10	65,60
45	0,0319	0,0772	48,60	66,60
50	0,0298	0,0716	49,20	67,50
55	0,0285	0,0680	49,20	67,90
60	0,0277	0,0661	49,40	68,10

Tabela F.5: Dados experimentais de tempo, umidade e temperatura dos sólidos e temperatura do ar para as partículas de sílica-gel. $\Gamma = 0,0$ - $T_{gb} = 70^{\circ}\text{C}$
 $Y_{eq} = 0,014$ (b.s)

t (min)	Y_s (b.s)	YR	T_s ($^{\circ}\text{C}$)	T_{g2} ($^{\circ}\text{C}$)
0	0,2442	1,0000	27,90	70,00
5	0,1690	0,6735	36,90	48,30
10	0,1233	0,4749	39,80	52,20
15	0,0913	0,3358	43,00	56,30
20	0,0727	0,2552	45,40	59,90
25	0,0593	0,1969	46,50	62,60
30	0,0509	0,1605	47,20	64,40
35	0,0466	0,1418	48,30	65,80
40	0,0452	0,1356	48,50	66,60
45	0,0426	0,1243	48,90	67,10
50	0,0417	0,1202	49,60	67,40
55	0,0417	0,1202	50,40	67,80
60	0,0415	0,1196	50,70	67,80

Tabela F.6: Dados experimentais de tempo, umidade e temperatura dos sólidos e temperatura do ar para as partículas de sílica-gel. $\Gamma = 0,5$ - $T_{gb} = 70^{\circ}\text{C}$
 $Y_{eq} = 0,014$ (b.s)

t (min)	Y_s (b.s)	YR	T_s ($^{\circ}\text{C}$)	T_{g2} ($^{\circ}\text{C}$)
0	0,3015	1,0000	30,60	70,00
5	0,2271	0,7412	37,10	46,70
10	0,1708	0,5452	39,50	49,10
15	0,1273	0,3939	41,40	53,10
20	0,0971	0,2891	43,40	56,90
25	0,0757	0,2146	46,00	60,50
30	0,0651	0,1776	47,50	63,00
35	0,0587	0,1555	48,10	64,80
40	0,0525	0,1339	48,40	65,80
45	0,0511	0,1291	48,90	66,40
50	0,0506	0,1274	49,30	66,70
55	0,0492	0,1225	49,30	66,90
60	0,0479	0,1180	49,40	67,10

Tabela F.7: Dados experimentais de tempo, umidade e temperatura dos sólidos e temperatura do ar para as partículas de sílica-gel. $\Gamma = 1,0$ - $T_{gb} = 70^{\circ}\text{C}$
 $Y_{eq} = 0,014$ (b.s)

t (min)	Y_s (b.s)	YR	T_s ($^{\circ}\text{C}$)	T_{g2} ($^{\circ}\text{C}$)
0	0,2546	1,0000	29,20	70,00
5	0,1920	0,7396	35,60	46,80
10	0,1366	0,5096	39,50	52,60
15	0,1009	0,3610	42,30	56,50
20	0,0786	0,2684	45,20	60,30
25	0,0642	0,2088	47,60	63,80
30	0,0573	0,1801	47,90	65,40
35	0,0525	0,1599	48,50	67,00
40	0,0506	0,1523	49,30	67,20
45	0,0500	0,1494	49,50	67,40
50	0,0498	0,1488	49,60	67,50
55	0,0490	0,1456	49,60	67,50
60	0,0490	0,1455	49,60	67,50

Tabela F.8: Dados experimentais de tempo, umidade e temperatura dos sólidos e temperatura do ar para as partículas de sílica-gel. $\Gamma = 1,5$ - $T_{gb} = 70^{\circ}\text{C}$
 $Y_{eq} = 0,014$ (b.s)

t (min)	Y_s (b.s)	YR	T_s ($^{\circ}\text{C}$)	T_{g2} ($^{\circ}\text{C}$)
0	0,2566	1,0000	30,90	70,00
5	0,1919	0,7333	37,20	45,20
10	0,1503	0,5620	39,40	47,90
15	0,1142	0,4130	41,30	52,00
20	0,0856	0,2952	43,40	55,60
25	0,0691	0,2273	45,40	59,30
30	0,0556	0,1716	47,50	62,60
35	0,0481	0,1404	49,30	64,80
40	0,0442	0,1244	50,10	66,30
45	0,0434	0,1211	50,30	67,20
50	0,0406	0,1098	50,70	67,70
55	0,0387	0,1019	51,20	68,20
60	0,0387	0,1016	51,30	68,50