

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

**ANÁLISE DA SECAGEM DE PARTÍCULAS DE ALUMINA EM SECADOR
VIBROFLUIDIZADO**

TÉRBIO GERALDO DOS REIS

São Carlos – SP

2015

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

**ANÁLISE DA SECAGEM DE PARTÍCULAS DE ALUMINA EM SECADOR
VIBROFLUIDIZADO**

TÉRBIO GERALDO DOS REIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. José Teixeira Freire
Co-orientador: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire

São Carlos – SP

2015

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

R375as Reis, Tércio Geraldo dos.
Análise da secagem de partículas de alumina em secador
vibrofluidizado / Tércio Geraldo dos Reis. -- São Carlos :
UFSCar, 2015.
90 f.

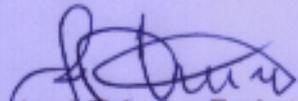
Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São
Carlos, 2015.

1. Secagem. 2. Alumina. 3. Leito vibrofluidizado. 4.
Modelo difusivo. 5. Redes neurais. I. Título.

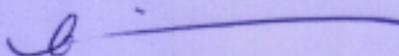
CDD: 660.28426 (20^ª)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE TÉRBIO GERALDO DOS REIS APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 04 DE MARÇO DE 2015.

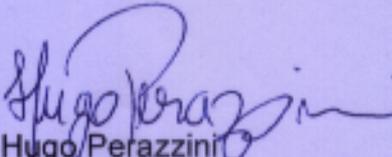
BANCA EXAMINADORA:



José Teixeira Freire
(Orientador), UFSCar



Maria do Carmo Ferreira
UFSCar



Hugo Perazzini
UNIFEI

AGRADECIMENTOS

À Deus pela oportunidade e força de cumprir mais uma etapa na minha vida.

À Priscila Garcia Ferreira dos Reis, minha amiga, companheira, esposa e eterna namorada, meus sinceros agradecimentos por ter me incentivado, apoiado e por ter estado sempre ao meu lado para me ajudar ao longo desta etapa.

Ao meu pai que mesmo tendo estado por pouco tempo na minha vida e à minha avó que partiu ao meu lado me ensinaram através de suas trajetórias a sempre lutar e nunca desistir. À minha mãe por todo apoio, incentivo e amor incondicional. Ao meu irmão Thalles, minha tia Sandra e meus primos Leandro e Vinícius por acreditar sempre em mim.

Ao meu sogro Bertolino e minha sogra Vitalina pelos conselhos, pelo incentivo, por todo apoio e principalmente por sempre me terem como filho.

Ao meu orientador, Professor José Teixeira Freire, pela orientação fraternal, conselhos, amizade, paciência e por desde o primeiro contato ter me aceitado e levado a um patamar que jamais conseguiria chegar sozinho. Meus sinceros agradecimentos e admiração.

Ao meu co-orientador Fábio Bentes Freire, pelo companheirismo, amizade e colaboração para realização deste trabalho.

Aos professores Dermeval José Mazzini Sartori, Gustavo Dias Maia, Maria do Carmo Ferreira, Ronaldo Guimarães Corrêa, Rodrigo Béttega e Thiago Faggió Pádua pela colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Ao técnico Edilson Milaré pela colaboração durante as análises realizadas.

À todos meus amigos do centro de secagem por me ajudarem na realização deste trabalho.

Aos meus amigos que me acolheram em São Carlos, Samuel, Mariana, Davi Miguel, Roger e Paula.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

RESUMO

A alumina ativada é amplamente utilizada como dessecante ou adsorvente. Para a reutilização desse material é necessário submetê-la ao processo de secagem. Dentro deste contexto, este trabalho foi um estudo para obter a partícula de alumina com a menor umidade possível, utilizando um secador de leito vibrofluidizado. O trabalho foi desenvolvido em etapas, onde para melhor compreensão do processo de secagem do material, primeiramente foi feita a secagem em estufa, tendo como variável somente a temperatura do ar de secagem. Em seguida, para analisar quais as variáveis que influenciam no processo de secagem deste material, foi feita secagem em camada fina, utilizando um secador de leito fixo, tendo como variável, além da temperatura, também a velocidade do ar de secagem. Foi feita a classificação do material segundo Geldart (1973), onde são fornecidos dados importantes sobre o comportamento fluidodinâmico do material em leitos fluidizados. Após essas etapas, e já tendo a classificação do material, foi realizado um estudo da fluidodinâmica do material em leito vibrofluidizado e, por fim, a secagem em leito vibrofluidizado. No secador vibrofluidizado foram feitos testes de secagem para determinação da faixa de operação em que os experimentos poderiam ser realizados. Após os testes o comportamento da secagem da alumina foi analisado em diferentes situações, variando a temperatura e a velocidade do ar de secagem, amplitude e frequência de vibração. Foram utilizados no tratamento dos dados, ajustes dos resultados experimentais a modelos capazes de representar a cinética de secagem da alumina, sendo estes os modelos difusivo, semiempíricos e também a técnica de redes neurais. No intervalo de condições experimentais utilizadas nos experimentos, observou-se: comportamentos distintos para cinética de secagem e fluidodinâmica para um mesmo adimensional de vibração obtido através de duas combinações diferentes de amplitude e frequência; o modelo difusivo se ajustou bem aos dados experimentais, porém, sendo necessário antes analisar as condições de contorno utilizadas; os modelos semiempíricos que melhor se ajustaram aos dados experimentais foram o de Page (1974) e Overhults et al. (1973) e que uma única rede neural foi capaz de ajustar bem aos dados experimentais.

ABSTRACT

Activated alumina is widely used as a desiccant or as an adsorbent. In order to reuse the material, it is necessary to submit it to the drying process. In this context, a research was carried out to obtain the alumina with the lowest possible moisture using vibrofluidized bed dryer. For a better comprehension of the drying of the material, the development of this study was divided in parts and the first one consists of kiln drying in which the only variable is the air temperature. Then, intending to analyze the variables that are capable to influence on drying process, a thin layer drying was carried out using a fixed bed dryer. In this case there are two variables: the temperature and velocity of the drying air. After that, the material was classified according to Geldart's classification (1973), which allows the inference of important data about the material fluid dynamic behavior in fluidized beds. After having the material classified, a study about the fluid dynamic of the material was performed, followed by its drying in vibrofluidized bed dryer. Tests were carried out to determine the equipment's operating range. Afterwards, the drying behavior was analyzed in different situations, in which air temperature and velocity and also vibration amplitude and frequency were changed. In data processing, diffusive, empirical and ANNs models were fitted to experimental data to analyze which one could represent alumina's drying kinetics. In the range of experimental conditions investigated, it was observed that: alumina's drying kinetics and its fluid dynamic present different behavior for the same dimensionless vibration number obtained from two different combinations of amplitude and frequency; diffusive models fitted well to experimental when the right boundary conditions were used; the empirical models which best fitted to experimental data were Page (1974) and Overhults et al. (1973) models; and a single ANN was able to fit to all the experimental data.

Lista de figuras

Figura 2.1: Diagrama de Geldart para classificação das partículas	19
Figura 2.2:(a) variação da umidade em base seca em função do tempo (s) e (b) taxa de secagem do material em função do teor de umidade em base seca.	24
Figura 2.3: Esquema de uma rede neural artificial.	30
Figura 3.1: Esquema do equipamento para determinação da cinética de secagem em camada fina	32
Figura 3.2: Equipamento para a secagem em leito vibrofluidizado	33
Figura 4.1: Cinética de secagem em estufa para temperatura de 70°C	38
Figura 4.2: Média de cinética de secagem em estufa para temperatura de 70°C	39
Figura 4.3: Cinética de secagem em estufa	40
Figura 4.4: Curva de Krischer para secagem em estufa e temperatura de 70°C	41
Figura 4.5: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Lewis (1921)- estufa temperatura de 70°C	42
Figura 4.6: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Brooker et al. (1974) - estufa temperatura de 70°C	42
Figura 4.7: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Henderson & Henderson (1968) - estufa temperatura de 70°C	43
Figura 4.8: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Page (1949) - estufa temperatura de 70°C	43
Figura 4.9: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Overhults et al. (1973) - estufa temperatura de 70°C	44
Figura 4.10: Taxa de secagem em função do tempo para secagem em estufa e temperatura de 70°C	44
Figura 4.11: Cinética de secagem para temperatura do ar de 70°C e velocidades de 1, 2 e 3m/s.....	45
Figura 4.12: Curva de Krischer para temperatura do ar de 70°C e velocidades de 1, 2 e 3m/s	46
Figura 4.13: Cinética de secagem para velocidade do ar de 2m/s e temperatura de 60, 80 e 120°C	47
Figura 4.14: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente em camada fina para temperatura e velocidade do ar secagem de 60°C e 1m/s, respectivamente e previstos pelo modelo difusivo utilizando C.C.2(a)	48
Figura 4.15: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente em camada fina para temperatura e velocidade do ar secagem de 60°C e 1m/s, respectivamente e previstos pelo modelo difusivo utilizando C.C.2(b)	49
Figura 4.16: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente em camada fina para temperatura e velocidade do ar secagem de 60°C e 1m/s, respectivamente e previstos pelo modelo difusivo utilizando C.C.2(a) e C.C.2(b)	49
Figura 4.17: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente em camada fina para temperatura e velocidade do ar secagem de 120°C e 3m/s, respectivamente e previstos pelo modelo difusivo utilizando C.C.2(a).....	50

Figura 4.18: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previsto pelos modelos de modelo difusivo utilizando a C.C.2(a) com n=1 e n=1000 para secagem em camada fina para temperatura de 120°C e velocidade do ar de 3m/s	51
Figura 4.19: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Lewis (1921) – camada fina temperatura e velocidade de 80°C e 2m/s respectivamente	54
Figura 4.20: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Brooker et al. (1974) – camada fina temperatura e velocidade de 80°C e 2m/s respectivamente	55
Figura 4.21: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Henderson & Henderson (1968) – camada fina temperatura e velocidade de 80°C e 2m/s respectivamente	55
Figura 4.22: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Page (1949) – camada fina temperatura e velocidade de 80°C e 2m/s respectivamente	56
Figura 4.23: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Overhults et al. (1973) – camada fina temperatura e velocidade de 80°C e 2m/s respectivamente	56
Figura 4.24: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de redes neurais – camada fina temperatura e velocidade de 80°C e 1m/s respectivamente	57
Figura 4.25: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de redes neurais – camada fina temperatura e velocidade de 100°C e 1m/s respectivamente	58
Figura 4.26: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de redes neurais – camada fina temperatura e velocidade de 100°C e 3m/s respectivamente	58
Figura 4.27: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente para temperatura de 70°C e velocidade do ar de secagem de 1 e 2m/s respectivamente e dados simulados pelo modelo de redes neurais para velocidade do ar de 1,5m/s em camada fina	59
Figura 4.28: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente para velocidade do ar de secagem de 2m/s e temperatura de 80 e 100°C respectivamente e dados simulados pelo modelo de redes neurais para temperatura de 90°C em camada fina	59
Figura 4.29: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previsto pelos modelos de Overhults et al. (1973), redes neurais e modelo difusivo C.C.2(b) para secagem em camada fina para temperatura de 60°C e velocidade do ar de 1m/s	60
Figura 4.30: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previsto pelos modelos de Overhults et al. (1973), redes neurais e modelo difusivo C.C.2(a) para secagem em camada fina para temperatura de 120°C e velocidade do ar de 3m/s	61
Figura 4.31: Curva fluidodinâmica para leito fluidizado	62

Figura 4.32: Curva fluidodinâmica para leito vibrofluidizado	63
Figura 4.33: Tipos de curvas características: (a) leito fluidizado; (b, c, d) leito vibrofluidizado; escalas logarítmicas	64
Figura 4.34: Cinética de secagem em leito vibrofluidizado para temperatura de 70°C, $\Gamma = 4$; A: 0,003m e f:18,2Hz	66
Figura 4.35: Curva de Krischer para secagem em leito vibrofluidizado a temperatura de 70°C, $\Gamma = 4$; A: 0,003m e f:18,2Hz	67
Figura 4.36: Cinética de secagem em leito vibrofluidizado para temperatura de 100°C, $\Gamma = 4$; A: 0,021m e f:6,8Hz	68
Figura 4.37: Partículas de alumina que foram secas utilizando A: 0,021m e f:6,8Hz	69
Figura 4.38: Cinética de secagem para leito vibro fluidizado a temperatura de 80°C e $\Gamma = 4$	69
Figura 4.39: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente em leito vibrofluidizado para temperatura e velocidade do ar secagem de 70°C e U_{mvf} , respectivamente, $\Gamma = 4$; A: 0,003m e f:18,2Hz e previstos pelo modelo difusivo utilizando C.C.2(a)	70
Figura 4.40: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente em leito vibrofluidizado para temperatura e velocidade do ar secagem de 70°C e $1,0U_{mvf}$, respectivamente, $\Gamma = 4$; A: 0,003m e f:18,2Hz e previstos pelo modelo difusivo utilizando C.C.2(b)	71
Figura 4.41: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente em leito vibrofluidizado para temperatura e velocidade do ar secagem de 70°C e $1,2U_{mvf}$, respectivamente, $\Gamma = 4$; A: 0,003m e f:18,2Hz e previstos pelo modelo difusivo utilizando C.C.2(a) e C.C.2(b)	72
Figura 4.42: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente em leito vibrofluidizado para temperatura e velocidade do ar secagem de 100°C e $1,0U_{mvf}$, respectivamente, $\Gamma = 4$; A: 0,021m e f:6,8Hz e previstos pelo modelo difusivo utilizando C.C.2(b)	73
Figura 4.43: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Lewis (1921) – leito vibrofluidizado a temperatura e velocidade do ar de secagem de 80°C e $1,0U_{mvf}$, respectivamente e $\Gamma = 4$; A: 0,003m e f:18,2Hz	76
Figura 4.44: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Brooker et al. (1974) – leito vibrofluidizado a temperatura e velocidade do ar de secagem de 80°C e $1,0U_{mvf}$, respectivamente e $\Gamma = 4$; A: 0,003m e f:18,2Hz	76
Figura 4.45: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Henderson & Henderson (1968) – leito vibrofluidizado a temperatura e velocidade do ar de secagem de 80°C e $1,0U_{mvf}$, respectivamente e $\Gamma = 4$; A: 0,003m e f:18,2Hz	77
Figura 4.46: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Page (1949) – leito vibrofluidizado a temperatura e velocidade do ar de secagem de 80°C e $1,0U_{mvf}$, respectivamente e $\Gamma = 4$; A: 0,003m e f:18,2Hz	77

Figura 4.47: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Page (1949) – leito vibrofluidizado a temperatura e velocidade do ar de secagem de 80°C e $1,0U_{mvf}$, respectivamente e $\Gamma= 4$; A: 0,003m e f:18,2Hz	78
Figura 4.48: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de redes neurais – para secagem em leito vibrofluidizado a temperatura e velocidade de 70°C e $1,0U_{mvf}$ $\Gamma= 4$ e A:0,003m e f: 18,2Hz.....	79
Figura 4.49: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de redes neurais – para secagem em leito vibrofluidizado a temperatura e velocidade de 100°C e $1,0U_{mvf}$ $\Gamma= 4$ e A:0,021m e f: 6,8Hz.....	79
Figura 4.50: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente para velocidade do ar de secagem de $1,0U_{mvf}$ e $1,2U_{mvf}$ respectivamente e temperatura de 70°C e dados simulados pelo modelo de redes neurais para $1,1U_{mvf}$ em leito vibrofluidizado	80
Figura 4.51: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente para temperatura do ar de secagem de 80 e 100°C respectivamente e velocidade de $1,0U_{mvf}$ e dados simulados pelo modelo de redes neurais para 90°C em leito vibrofluidizado	81
Figura 4.52: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previsto pelos modelos difusivo C.C.2(b), Overhults et al. (1973) e redes neurais para secagem em leito vibrofluidizado para temperatura de 70°C e $1,2U_{mvf}$ com $\Gamma= 4$ e A:0,003m e f: 18,2Hz.....	82
Figura 4.53: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previsto pelos modelos difusivo C.C.2(b), Overhults et al. (1973) e redes neurais para secagem em leito vibrofluidizado para temperatura de 70°C e $1,0U_{mvf}$ com $\Gamma= 4$ e A:0,021m e f: 6,8Hz.....	82

Lista de tabelas

Tabela 2.1: Propriedades físicas e estruturais das partículas de alumina.....	17
Tabela 2.2:Equações empíricas e semiempíricas de secagem.....	26
Tabela 4.1: Parâmetros estatísticos da regressão linear para verificação da reprodutibilidades dos dados para secagem em estufa	39
Tabela 4.2: Ajuste dos dados experimentais para secagem em estufa para temperatura de 70°C	41
Tabela 4.3: Difusividade efetiva prevista pelo modelo difusivo para camada fina.....	52
Tabela 4.4: Resultados estatísticos para ajuste dos modelos empíricos aos dados experimentais para cinética de secagem em camada fina	52
Tabela 4.5: Teste de homogeneidade para o leito vibrofluidizado	65
Tabela 4.6: Difusão efetiva prevista pelo modelo difusivo para secagem em leito vibrofluidizado	73
Tabela 4.7: : Resultados estatísticos para ajuste dos modelos empíricos aos dados experimentais para cinética de secagem em leito vibrofluidizado	74

Lista de símbolos

A	Amplitude de vibração [L]
\bar{D}	Diâmetro médio de Sauter, [L]
D_{eff}	Difusividade efetiva [L^2T^{-1}]
$D_{\text{eff},l}$	Difusividade efetiva de líquido [L^2T^{-1}]
d_p	Diâmetro da partícula [L]
f	Frequência de vibração [T^{-1}]
g	Aceleração da gravidade, [LT^{-2}]
h_m	Coefficiente convectivo de transferência de massa [$L T^{-1}$]
K	Constante de secagem [dimensão dependente da equação]
L	Espessura [L]
m	Massa da partícula [M]
n	Número de termos da série infinita [-]
Q	Vazão de ar [L^3T]
t	Tempo [T]
U	Velocidade do ar [LT^{-1}]
U_{mf}	Velocidade de mínima fluidização [LT^{-1}]
U_{mvf}	Velocidade de mínima vibrofluidização [LT^{-1}]
V_b	Volume das partículas empacotadas [L^3]
V_p	Volume total da partícula [L^3]
V_s	Volume do sólido [L^3]
X	Umidade em base seca [$M M^{-1}$]
\bar{X}	Umidade média [$M M^{-1}$]
X_0	Umidade inicial [$M M^{-1}$]
X_{cr}	Umidade crítica [$M M^{-1}$]
X_{eq}	Umidade de equilíbrio [$M M^{-1}$]
X_i	Sinal da camada de entrada [-]
x_i	Fração mássica de partículas [-]
Y_i	Sinal da camada de saída [-]
Y_{∞}	Umidade do gás de secagem [$M M^{-1}$]
YR	Umidade adimensional [-]
z	Coordenada espacial [L]

Símbolos gregos

Γ	Adimensional de vibração [-]
ϵ_p	Porosidade da partícula [-]
λ_n	Raízes da equação transcendental [-]
ω	Frequência angular [T^{-1}]
ρ_{ap}	Massa específica aparente [ML^{-3}]
ρ_b	Massa específica bulk [ML^{-3}]
ρ_g	Massa específica do gás [ML^{-3}]
ρ_m	Massa específica do meio poroso [ML^{-3}]
ρ_r	Massa específica real [ML^{-3}]
ℓ	Comprimento característico [L]

Parâmetro das equações

A,B,C	Parâmetro relativos às equações de cinética de secagem
-------	--

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Alumina ativada.....	16
2.1.1	Características das partículas de alumina	16
2.1.1.1	Dimensões características	17
2.1.1.2	Massa específica.....	18
2.1.1.3	Porosidade	19
2.2	Classificação de Geldart	19
2.3	Leito Vibrofluidizado.....	20
2.4	Regime de operação nos leitos vibrofluidizado	21
2.5	Cinética de Secagem	23
2.6	Secagem em camada fina.....	25
2.7	Modelos matemáticos	25
2.7.1	Equações semiempíricas.....	25
2.7.2	Modelo difusivo.....	26
2.7.3	Redes Neurais.....	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	Material	31
3.2	Equipamentos	31
3.2.1	Secagem em estufa.....	31
3.2.2	Secador de leito vibrofluidizado	33
3.3	Metodologia Experimental.....	34
3.3.1	Cinética da secagem em estufa.....	34
3.3.2	Cinética da secagem em camada fina.....	35
3.3.3	Fluidodinâmica do leito vibrofluidizado	35
3.3.4	Cinética da secagem em leito vibrofluidizado.....	36
3.4	Critério para verificação de reprodutibilidade dos dados.....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	Cinética da secagem em estufa	38

4.2	Cinética de secagem em camada fina	45
4.3	Fluidodinâmica	62
4.4	Cinética de secagem leite vibrofluidizado	65
5	CONCLUSÕES.....	84
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	86
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

1 INTRODUÇÃO

A técnica de adsorção tem sido muito usada em indústrias nas últimas décadas. Suas principais utilidades estão na remoção de compostos orgânicos presentes em efluentes industriais, recuperação de vapores de solventes, secagem e remoção de umidade de gases. O material utilizado nesta técnica, o adsorvente, deve ser um sólido que possui grande área superficial, sendo isto possível com materiais porosos como a alumina ativada. Após certo tempo em operação, os adsorventes começam a ficar saturados de umidade, sendo então necessário fazer a sua recuperação, submetendo-os ao processo de secagem.

Para que se obtenha uma secagem satisfatória, o processo deve ser criteriosamente analisado. O primeiro passo é levar em consideração as características do material a ser seco como, tamanho das partículas, densidade e demais propriedades. Após deve-se analisar os secadores disponíveis no mercado e selecionar qual melhor se adequa à situação. Para processos em grande escala, a utilização de secadores de leito fixo em camada espessa apresenta a desvantagem de que as partículas que compõem o leito possuem gradiente de umidade de acordo com a orientação do fluxo de ar, visto que o objetivo é obter partículas com umidade homogênea. Como alternativa, os secadores de leito fluidizado apresentam uma boa homogeneidade no interior do leito e melhoram o gradiente de umidade presente no leito fixo.

Geldart (1973) classificou materiais particulados de acordo com suas características de fluidização. As partículas de alumina utilizadas neste trabalho, de acordo com suas características se enquadram aos materiais do grupo D, que são de difícil fluidização. Assim, uma forma de melhorar a fluidização é a aplicação de vibração mecânica.

Com o objetivo de encontrar as melhores condições de operação no secador de leito vibrofluidizado para obter alumina com a menor umidade e possibilitar o desenvolvimento deste trabalho foi feita uma revisão bibliográfica para compreender o que já foi estudado, então a realização dos experimentos, análise dos resultados obtidos e ajuste dos dados experimentais cujos itens estão descritos no decorrer do trabalho para melhor compreensão do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas informações gerais sobre a alumina ativada, o processo de secagem e também uma revisão sobre a importância da utilização de secadores vibrofluidizado, cinética de secagem, uso de equações empíricas, modelo difusivo e uso de redes neurais.

2.1 Alumina ativada

Uma das formas do óxido de alumínio é a alumina ativada, que é capaz de fazer ligações com alguns líquidos e gases sem que a sua estrutura física e química seja alterada. A alumina ativada é um adsorvente poroso, produzido a partir da bauxita, por desidratação e cristalização, a elevadas temperaturas (Ruthven, 1984). Por ser um material muito poroso, essa característica o torna eficaz na utilização como dessecante de ar.

O dessecante é uma substância que é caracterizada por sua grande afinidade com a água, que ao ser utilizado, o processo de separação ocorre por adsorção.

Uma de suas principais aplicações é a utilização para desidratação de gases. Neste processo, depois de certo tempo de operação, ocorre a saturação da partícula, por isso é de extrema importância conhecer a secagem da alumina ativada. Além do mais, ela serve como base de referência para estudo de outros materiais porosos.

No item 2.1.1 será apresentada uma revisão sobre as características da alumina, feita por Perazzini (2014).

2.1.1 Características das partículas de alumina

Conhecer algumas características de uma partícula ou de um conjunto de partículas, preliminarmente como, a composição e as propriedades físicas e térmicas do material, é de extrema necessidade para algumas aplicações, como a secagem. Tais características são muito importantes, visto que auxiliam a compreensão dos fenômenos de transferência de calor e massa e também a modelagem do processo, pois a resolução de muitos modelos matemáticos depende de informações referentes ao conjunto de partículas (meio poroso). Assim, é possível dizer que esta

caracterização torna possível descrever o processo de secagem, dimensionar o secador, o sistema de armazenamento e avaliar os processos que envolvem transferência de calor e massa. Perazzini (2014) fez uma análise das características da alumina ativada e verificou que as características do meio poroso foram influenciadas diretamente pelas partículas que os constituem. A Tabela 2.1 apresenta as principais propriedades para as partículas de alumina de diâmetro de 2,80, 3,35 e 4,00mm respectivamente.

Tabela 2.1: Propriedades físicas e estruturais das partículas de alumina

Propriedades	Diâmetro das partículas [mm]		
	2,80	3,35	4,00
ρ_{ap} [kg/m ³]	1534	1501	1468
ρ_r [kg/m ³]	2502	2482	2455
ϵ_p [%]	39	40	41

Fonte: Perazzini (2014)

Cada umas das propriedades apresentadas estão descritas e explicadas nos subitens a seguir.

2.1.1.1 Dimensões características

Existem várias técnicas disponíveis para determinar as dimensões de uma partícula. Alguns autores utilizam mais de uma técnica em seus trabalhos.

Corrêa (2012) utilizou o método de análise de imagens com o auxílio do *software* IMAGE PRO PLUS 7, com o qual foi possível determinar as características geométricas do material, inclusive o diâmetro médio. Costa et al. (2011), trabalhando com celulose microcristalina utilizaram a técnica de peneiramento para fazer a determinação da distribuição granulométrica. Foi adotado como referência o diâmetro médio de Sauter que pode ser calculado a partir da equação 1.

$$\bar{D} = \frac{1}{\sum_i^n \frac{x_i}{D_i}} \quad (1)$$

onde, \bar{D} é diâmetro médio de Sauter, x_i é a fração mássica de partículas retidas em cada peneira e D_i é entre a peneira superior e inferior.

2.1.1.2 Massa específica

Segundo Key (1992), as densidades dos materiais sólidos podem ser definidas pelas equações (2), (3) e (4).

Massa específica real ou absoluta: definida pela razão entre a massa e o volume do sólido, excluindo os poros (equação 2).

$$\rho_r = \frac{m}{V_s} \quad (2)$$

Massa específica aparente ou efetiva: definida pela razão entre a massa do sólido e o volume total (volume do sólido mais o volume dos poros) ocupado pela partícula (equação 3).

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V_p} \quad (3)$$

Massa específica bulk ou volumétrica: definida pela razão entre a massa das partículas e o volume das partículas empacotadas livremente (equação (4)).

$$\rho_b = \frac{m_p}{V_b} \quad (4)$$

No caso de sólido não poroso, a densidade real pode ser medida pelo deslocamento de um fluido no qual o sólido seja inerte, utilizando a relação entre massa do sólido e volume deslocado pelo mesmo. Quando se trata de sólidos porosos no qual um líquido não pode penetrar completamente pelos poros, usa-se um gás como fluido de deslocamento.

2.1.1.3 Porosidade

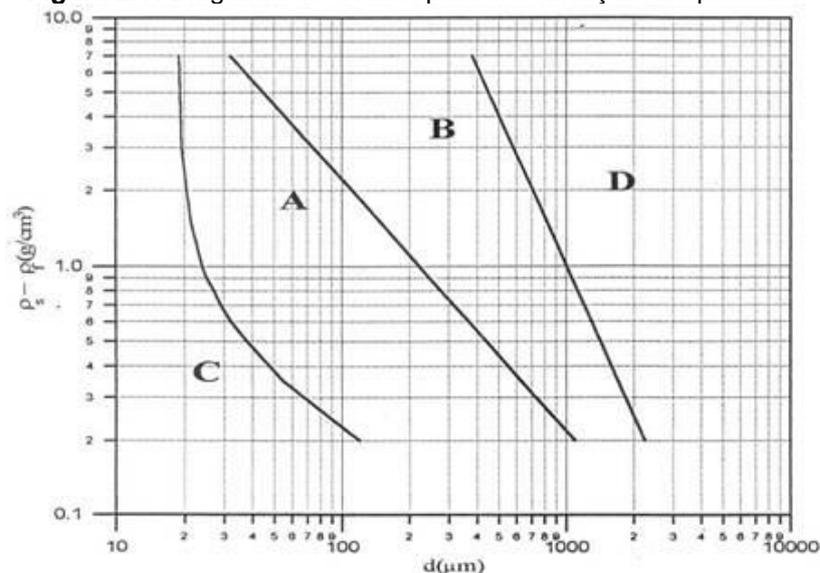
A porosidade de uma partícula (ε_p) é definida pela razão de espaços vazios do sólido em relação ao seu volume total. A partir dos valores obtidos da massa específica real e aparente, a porosidade pode ser calculada diretamente pela equação (5):

$$\varepsilon_p = \left\{ \left(1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_r} \right) \cdot 100 \right\} \quad (5)$$

2.2 Classificação de Geldart

Segundo Geldart (1973), o comportamento dos sólidos fluidizados por corrente de gás pode ser facilmente separado em quatro grupos, caracterizado apenas pela diferença de densidade e tamanho da partícula. Para representar esta classificação, a Figura 2.1 apresenta um diagrama em escala logarítmica onde são delimitadas as quatro regiões. Essas regiões são separadas pelos grupos A, B, C e D.

Figura 2.1: Diagrama de Geldart para classificação das partículas



Fonte: Geldart (1973)

O grupo A é composto por partículas de tamanho relativamente pequeno ou partículas de baixa densidade. As partículas deste grupo fluidizam facilmente a

baixas velocidades do gás e o leito expande-se consideravelmente antes de apresentar formação de bolhas.

Entre os materiais que compõem o grupo B a areia é o material mais típico deste grupo. Diferentemente do grupo A, há formação de bolhas com velocidades levemente acima da velocidade de mínima fluidização e a expansão do leito é baixa.

As partículas coesivas pertencem ao grupo C. No geral a fluidização dessas partículas é extremamente difícil. Essa dificuldade ocorre porque as forças de interação entre as partículas são maiores do que a força que o fluido exerce sobre a partícula, sendo resultado geralmente da interação entre partículas muito pequenas, cargas eletrostáticas altas ou a presença de um leito muito úmido ou material viscoso.

Composto por partículas relativamente grandes e de altas densidades, os materiais do grupo D são de difícil fluidização, devido à forma irregular e ao tamanho da partícula. O regime de escoamento nas vizinhanças das partículas pode ser turbulento e apresentar comportamentos imprevisíveis. Se o gás for admitido somente por um orifício central na base do leito, as partículas do grupo D podem jorrar. A fluidização e a transferência de calor desse grupo podem ser melhoradas através da aplicação de agitação ou vibração mecânica, que pode ser realizada com o uso de um secador de leito vibrofluidizado o qual será apresentado no item 2.3.

2.3 Leito Vibrofluidizado

Um secador de leito vibrofluidizado difere do fluidizado em virtude de uma energia vibracional imposta no sistema fluido-partícula, podendo essa vibração ocorrer de forma horizontal ou vertical. De acordo com Erdész (1990); Eccles e Mujumdar (1997); Cardoso e Kieckbusch (1999) e Daleffe e Freire (2004), quando comparado ao leito fluidizado, a introdução da vibração mecânica vertical é capaz de aumentar a eficiência da transferência de calor e massa e possibilitar a redução da velocidade de mínima fluidização e da perda de carga do leito. Pode ainda diminuir o volume das bolhas e minimizar o aparecimento de zonas mortas, aglomerações e canais preferenciais, além de possibilitar a fluidização de materiais adesivos, coesivos e pastosos.

A forma comum de quantificar essa energia vibracional do sistema é representada pelo adimensional de vibração Γ . Proposto por Chlenov e Mikhailov

(1965; 1972) como parâmetro com características universais, o adimensional de vibração é representado pela equação (6),

$$\Gamma = \frac{A \omega^2}{g} = \frac{A (2\pi f)^2}{g} \quad (6)$$

Sendo, A, f, ω e g a amplitude e frequência de vibração, frequência angular vibracional e aceleração da gravidade, respectivamente.

Os estudos sobre vibrofluidização encontram-se fundamentados especialmente nas pesquisas desenvolvidas por Bratu e Jinescu (1971), Gupta e Mujumdar (1980), Strumillo e Pakowski (1980) e Erdéz e Ormós (1984). Nesses trabalhos Γ foi utilizado como parâmetro universal. Porém, Daleffe (2005) encontrou divergência nos resultados e a não concordância na análise do comportamento dinâmico do leito quando somente caracterizado pelo adimensional de vibração. Daleffe (2005), ao fazer a análise do comportamento fluidodinâmico de um leito vibrofluidizado manteve um Γ fixo, e verificou que com a configuração de altas amplitudes e baixas frequências ocorreu a expansão do leito e em oposição, aplicando-se altas frequências e baixas amplitudes verificou que ocorreu a compactação do leito. Meili (2009), ao estudar a fluidodinâmica e a secagem de pastas em leitos vibrofluidizados, também verificou que para um mesmo Γ , obtido através de combinações diferentes entre amplitude e frequência foram encontradas diferenças significativas nos resultados de umidade relativa do material utilizado em função do tempo. Meili (2009) verificou ainda que para evaporação da água o regime permanente é atingido mais rapidamente na maior amplitude e menor frequência.

Quanto ao regime de operação dos leitos vibrofluidizados, existem diversas classificações, como estão descritas no item 2.4.

2.4 Regime de operação nos leitos vibrofluidizado

Baseado em observações visuais e dependentes da aceleração vibracional, Bratu e Jinescu (1971) definiram três regimes de operação de sistema vibrofluidizado, sendo elas:

- **Leito vibrado** – quando $\Gamma < 1$, a vibração somente ajuda a melhorar a estabilidade e homogeneidade do leito;
- **Leito vibrofluidizado** – quando $\Gamma \approx 1$, o escoamento de ar e a vibração contribuem para a fluidização do leito;
- **Leito fluidizado vibrado** – quando $\Gamma > 1$, o leito é essencialmente influenciado pelas forças vibracionais.

Baseado na velocidade de mínima fluidização para o leito submetido a qualquer vibração, Strumillo e Pakowski (1980) definiram os seguintes regimes:

- **Leito vibrofluidizado** – leito vibrado com aeração externa forçada para velocidades do ar (U) menores que a velocidade de mínima fluidização (U_{mf})
- **Leito fluidizado vibrado** – leito submetido à vibração com aeração externa forçada para $U > U_{mf}$.

Outra classificação baseada na faixa de condições operacionais foi apresentada por Pakowski et al. (1984):

- **Leito vibrado** – para $\Gamma > 1$ e sem escoamento de ar;
- **Leito vibrofluidizado** – para $\Gamma > 1$ e $U < U_{mf}$;
- **Leito fluidizado vibrado** – para qualquer Γ e $U > U_{mf}$.

Uma classificação ainda mais simplificada foi adotada por Daleffe (2005):

- **Leito vibrado** – qualquer leito composto por material particulado que sofre a ação de uma aceleração vibracional exclusivamente vertical, para qualquer Γ e sem escoamento de ar forçado;
- **Leito vibrofluidizado** – qualquer leito composto por material particulado que sofre a ação de uma aceleração vibracional exclusivamente vertical, para qualquer Γ e com escoamento de ar forçado.

Como a universalidade de Γ para caracterizar o estado do leito fluidizado foi posta em dúvida, a classificação da Daleffe (2005) é mais confiável.

Com o intuito de estudar a cinética de secagem em leito vibrofluidizado, nos próximos itens serão apresentados os principais conceitos sobre cinética de secagem e também secagem em camada fina que servirão de base para os estudos no leito vibrofluidizado.

2.5 Cinética de Secagem

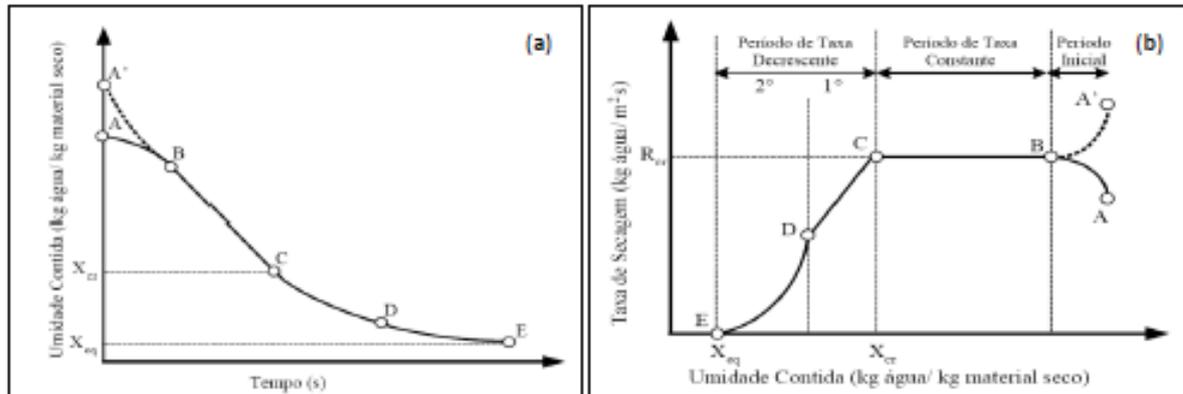
Basicamente, existem dois tipos de secagem, sendo elas a natural e a artificial. A secagem natural é um processo relativamente simples, o qual consiste na exposição do material à radiação solar, porém este requer grande área para exposição, maior mão de obra e também está sujeita às condições climáticas. Já a secagem artificial exige a utilização de equipamentos (secadores) e é um dos processos mais caros na indústria devido às suas exigências energéticas, no entanto proporciona maior uniformidade ao produto final, emprega menos mão de obra e reduz a área necessária para realização do processo.

A secagem é uma operação unitária que tem alta complexidade matemática para representar fenômenos que ocorrem simultaneamente, como transferência de calor, massa e quantidade de movimento (MENON e MUJUMDAR, 1987). A secagem de materiais sólidos envolve o transporte simultâneo de calor e massa nas seguintes formas:

- O calor é transferido do meio para o sólido a fim de evaporar o líquido e;
- A umidade na forma de vapor é transferida do sólido para o meio.

As condições de secagem variam muito, de acordo com as propriedades do ar, as características do sólido e com a forma que é feito o contato ar-sólido a ser secado. Quando o ar quente entra em contato com o produto, ocorre transferência de calor devido à diferença de temperatura existente entre eles. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de água que há entre a superfície do produto e o ar determinam a transferência de umidade. A evolução destes processos é mostrada na Figura 2.2 e pode ser dividida em três períodos distintos (PARK et al., 2007).

Figura 2.2:(a) variação da umidade em base seca em função do tempo (s) e (b) taxa de secagem do material em função do teor de umidade em base seca.



FONTE: FOUTS et al., 1982

. O período (A'-B ou A-B) é onde se dá o início da secagem. Nesta etapa, geralmente o ar é mais quente do que o produto, a pressão parcial do vapor de água na superfície do produto é insignificante, portanto a taxa de transferência de massa e velocidade de secagem também são insignificantes. Comparada ao tempo total de secagem, este período tem curta duração. Vale a pena ressaltar que o contrário também pode ocorrer, ou seja, a temperatura do ar ser inferior à temperatura do produto.

No período (B-C) a velocidade de secagem é constante. Nesta etapa, todo calor cedido é usado para evaporação da água na superfície e a temperatura também é constante e igual à temperatura de bulbo úmido do ar onde a transferência de calor e massa se compensam.

No período (C-E) a velocidade de secagem decresce, e tem início quando o material atinge a umidade crítica (X_{cr}). Nesta etapa, a troca de calor não é mais compensada pela transferência de massa, então a temperatura do produto tende a atingir a temperatura do ar. Neste período a água presente no interior do sólido migra para a superfície com velocidade menor que a evaporação da água na superfície, portanto a difusão líquida é que predomina nesta etapa. A taxa de secagem torna-se nula quando a umidade do ar estiver em equilíbrio com a umidade do produto (X_{eq}) (PARK et al., 2007).

Assim, para analisar quais as variáveis do processo exercem mais influência sobre a cinética de secagem, será apresentada no item 2.6 a secagem em camada fina que servirá como base para tal análise.

2.6 Secagem em camada fina

Quando se trata de materiais cujas informações sobre a cinética de secagem são escassas na literatura, o estudo da camada fina em leito fixo cresce de importância, pois possibilita verificar a influência das variáveis de processo sobre a transferência de massa. Assim é possível diferenciar os efeitos da temperatura, umidade e velocidade superficial do ar (PRADO 2000) no processo de secagem. Para que um sistema possa ser considerado como camada fina, o tempo de residência do gás no sistema deverá ser pequeno o suficiente afim de que o equilíbrio entre as fases seja atingido rapidamente e a variação de umidade e temperatura da fase gasosa na camada fina sejam desprezíveis. Deste modo, considera-se a camada fina um sistema onde a camada de material a ser seco seja delgada o suficiente para que os gradientes de umidade e temperatura possam ser considerados desprezíveis.

O propósito da aproximação do problema para camada fina é verificar a influência das condições operacionais do processo e também simplificar a complexa modelagem matemática da secagem apenas para balanços macroscópicos de massa. Desta forma no próximo item serão apresentados principais modelos matemáticos utilizados para descrever o processo de secagem.

2.7 Modelos matemáticos

Existem na literatura diversos métodos para analisar e descrever a cinética de secagem de materiais, sendo os mais utilizados os modelos semiempíricos e o difusivo e o mais recentemente abordado a técnica de redes neurais, que apesar de não ter nenhum significado físico, tem apresentado excelentes resultados na representação da cinética de secagem. Estes modelos estão apresentados nos itens a seguir.

2.7.1 Equações semiempíricas

As equações semiempíricas de modo geral baseiam-se na Lei de Newton do resfriamento aplicada à transferência de massa, o que presume que as condições

sejam isotérmicas. A Tabela 2.2 apresenta cinco das principais equações semiempíricas utilizadas na predição de cinética de secagem de diversos materiais.

Tabela 2.2:Equações empíricas e semiempíricas de secagem

Modelo	Equação
Lewis (1921) ¹	$YR = \exp(-Kt),$ $\text{onde: } K = A \exp(-B/T_f) \quad (7)$
Brooker et al. (1974) ²	$YR = C \exp(-Kt),$ $\text{onde: } K = A \exp(-B/T_f) \quad (8)$
Henderson & Henderson (1968) ³	$YR = C[\exp(-Kt) + 1/9 \exp(-Kt)],$ $\text{onde: } K = A \exp(-B/T_f) \quad (9)$
Page (1949) ⁴	$YR = \exp(-Kt^n),$ $\text{onde: } K = A \exp(-B/T_f) \quad (10)$
Overhults et al. (1973) ⁵	$YR = \exp[-(Kt)^n],$ $\text{onde: } K = \exp(A + B/T_f) \quad (11)$

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

2.7.2 Modelo difusivo

De acordo com Brooker et al. (1992), nos métodos teóricos normalmente são consideradas as condições externas sob as quais a operação ocorre, assim como os mecanismos internos de transferência de calor e massa. Segundo Park et al. (2002) os modelos teóricos que descrevem a taxa de secagem decrescente consideram geralmente como mecanismo principal a difusão baseada em uma equação similar à lei de Fick, somente com o parâmetro difusividade efetiva no lugar da difusividade tradicional.

Para o modelo difusivo, ao fazer o balanço de massa e considerar a transferência de massa unidirecional (eixo z), obtêm-se a equação (12):

$$\frac{\partial X(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{eff} \frac{\partial X(z, t)}{\partial z} \right] \quad (12)$$

Para obter a solução analítica do modelo difusivo, considera-se a difusividade efetiva de líquido e as propriedades do sólido constantes, conteúdo de umidade inicial uniforme e encolhimento do meio poroso desprezível. Desta forma é obtida a equação (13):

$$\frac{\partial X(z, t)}{\partial t} = D_{eff,l} \frac{\partial^2 X(z, t)}{\partial z^2} \quad (13)$$

A equação (13) está sujeita às seguintes condições inicial e de contorno:

$$\text{C.I.: } X(z,t)|_{t=0} = X_0, \quad t = t_0, \quad 0 < z < L \quad (14)$$

$$\text{C.C.1: } \left[\frac{\partial X(z,t)}{\partial z} \right]_{z=0} = 0, \quad t > 0 \quad (15)$$

A C.C.1 é geralmente aplicada em sistemas com geometria que se aproxima de uma placa plana de comprimento $2L$ com $-L < z < L$ e que durante o processo de secagem, seca simetricamente tanto para $-L < z$ quanto para $z < L$. Em situações em que o meio poroso recebe uma corrente de ar ascendente na superfície inferior, deve ser considerada a hipótese de que não existe troca de massa da superfície inferior com o ambiente abaixo de $z=0$.

Existem duas condições de contorno o qual podem ser consideradas em $z=L$. Para condições onde a resistência externa a transferência de massa é considerada desprezível, é considerado que se estabelece equilíbrio instantâneo na superfície superior do meio poroso ($z = L$), supondo a condição de contorno 2 (a).

$$\text{C.C.2(a): } X(z, t)|_{z=L} = X_{eq}, \quad t > 0 \quad (16)$$

A solução analítica para a equação (13) segundo as hipóteses e condições inicial e de contorno apresentadas, obtida por Crank (1975) através do método de separação de variáveis é:

$$X(t) = X_{eq} + (X_0 - X_{eq})2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\lambda_n} \cos(\ell \cdot \lambda_n) \exp\left(\lambda_n^2 \frac{D_{eff,l}}{L^2} t\right) \quad (17)$$

Uma vez que a concentração média espacial de umidade no meio poroso ao longo tempo é o que se obtém experimentalmente, o conteúdo de umidade média do meio poroso é obtido por:

$$\bar{X}(t) = \frac{1}{L} \int_0^L X(z, t) dz \quad (18)$$

Ao substituir a equação (17) na equação (18) e realizar a integração, o conteúdo de umidade adimensional (YR) em função do tempo é:

$$YR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\left(n + \frac{1}{2}\right)^2 \pi^2 \frac{D_{eff,l}}{L^2} t\right] \quad (19)$$

Quando a velocidade do gás altera a difusão efetiva de líquido, segundo Chen (2007), há outra condição de contorno que considera a convecção mássica na superfície do material, representada pela equação (20):

$$\text{C.C.2(b): } \left. \left[\frac{\partial X(z,t)}{\partial z} \right] \right|_{z=L} = - \frac{h_m \cdot \rho_g}{D_{eff,l} \cdot \rho_m} (Y_{eq} - Y_{\infty}), t > 0 \quad (20)$$

De acordo com Cremasco (2008), ao considerar a condição de contorno de convecção e simetria é obtida a equação (21):

$$YR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin^2(\lambda_n)}{\lambda_n^2 + \lambda_n \sin(\lambda_n) \cos(\lambda_n)} \exp\left[-\lambda_n^2 \frac{D_{eff,l}}{L^2} t\right] \quad (21)$$

Os autovalores (λ_n) podem ser conhecidos através da equação transcendental:

$$Bi_m = \lambda_n \cdot tg(\lambda_n) \quad (22)$$

2.7.3 Redes Neurais

Modelos de redes neurais artificiais têm sido usados com sucesso para predição de problemas na bioengenharia e na engenharia química (Baughman and Liu, 1995).

Segundo Movagharnejad et al (2007), as redes neurais artificiais são capazes de descrever um intervalo de experimentos enquanto as aplicações das correlações empíricas é limitada apenas para um experimento específico.

Redes neurais artificiais (RNAs) são sistemas que se assemelham às características de desempenho das redes neurais do cérebro humano. (Movagharnejad et al, 2007)

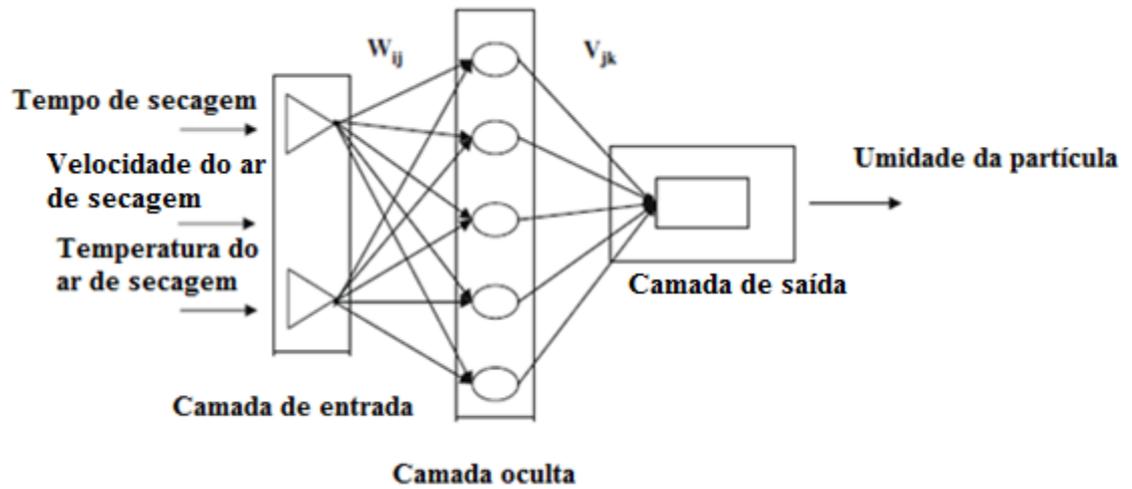
As redes neurais utilizam diversas células computacionais simples e interligadas, chamadas de neurônios. Os parâmetros computacionais são armazenados nos neurônios em unidades denominadas pesos sinápticos, e seus valores são modificados à medida que a rede sofre o processo de aprendizagem. Esta modificação ocorre para alcançar o valor alvo (Breve, 2006).

Patterson (1996), baseando-se na arquitetura das redes, definiu-as em três classes: redes aplicadas a camada única, redes aplicadas a multicamadas e redes neurais recorrentes.

Na literatura, a maioria dos artigos usa redes neurais aplicadas a multicamadas. O esquema desta rede neural está representado pela Figura 2.3. O sistema de neurônios é composto por três camadas:

- Camada de entrada: onde são lidos todos os dados e informações do processo
- Camada Oculta: onde todas as informações da camada de entrada são processadas
- Camada de saída: o vetor de saída é computado no final

Figura 2.3: Esquema de uma rede neural artificial.



Fonte: Topuz, 2009

Cada unidade de entrada da camada de entrada recebe o sinal X_i e transmite o sinal para todas as unidades na camada oculta. Cada unidade oculta Y_j , descrita pela equação 23, realiza uma soma ponderada dos sinais de entrada e aplica a função de ativação para computar o sinal de saída dos neurônios.

$$Y_j = f_{act}(\sum W_{ij}X_i + b_j) \quad (23)$$

onde W_{ij} é a ponderação da conexão da unidade de entrada i para a unidade oculta j , b_j é a ponderação de bias para unidade oculta. O sinal de saída de cada unidade Y_j enviada para todas as unidades de saída (TOPUZ, 2009). A função de ativação, f_{act} , pode ser uma função linear, rampa, degrau, tangente hiperbólica ou sigmoial (FERREIRA, 2004).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais e a metodologia utilizada nos processos experimentais, os quais foram executados no Centro de Secagem do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos. Para melhor compreensão do trabalho, a secagem foi feita primeiramente em estufa, tendo somente a temperatura como variável de processo, seguido pela secagem em camada fina para analisar a influência de variáveis como velocidade e temperatura do ar no processo de secagem do material, seguida da análise do comportamento fluidodinâmico e da cinética de secagem no leito vibrofluidizado.

3.1 Material

O material utilizado neste trabalho foi a alumina ativada de d_p de 5,66mm, $\rho_p = 1,6 \text{ g/cm}^3$ composto por óxido de alumínio puro o qual foi submetido ao processo de calcinação.

3.2 Equipamentos

Neste tópico serão apresentados os equipamentos que foram utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. Serão descritos os equipamentos para secagem em estufa, secagem em camada fina e o secador de leito vibrofluidizado.

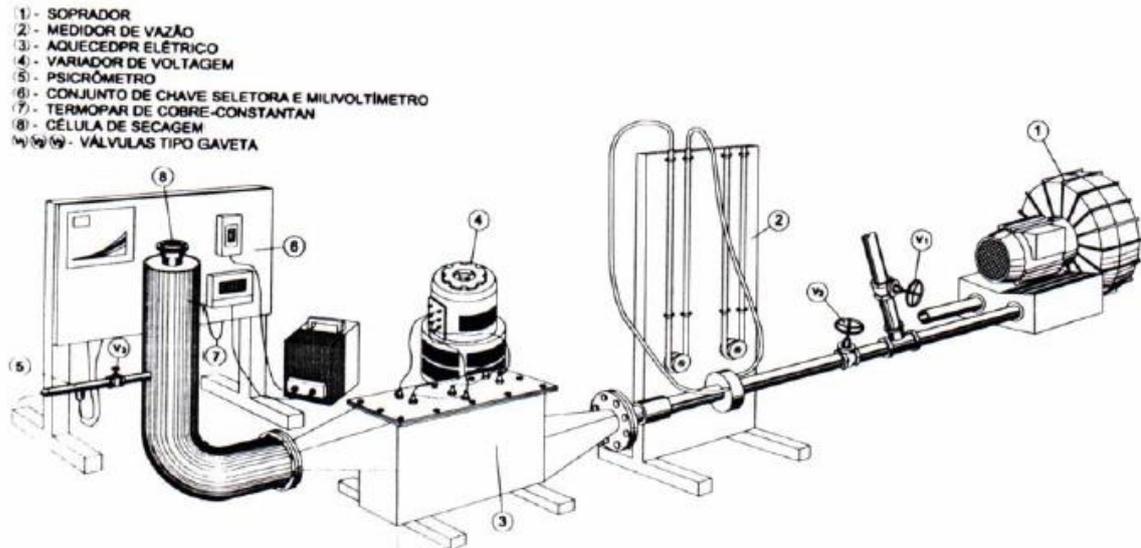
3.2.1 Secagem em estufa

Para determinar a cinética de secagem em estufa foi utilizada uma estufa da marca FANEM modelo 315 SE com controle automático de temperatura e variação de $\pm 3^\circ\text{C}$, também uma balança analítica da marca GEHAKA modelo BK 400 com precisão de 10^{-3} gramas e um cronômetro.

3.2.1.1 Secagem em camada fina

A Figura 3.1 representa equipamento que foi utilizado para determinar a cinética de secagem em camada fina.

Figura 3.1: Esquema do equipamento para determinação da cinética de secagem em camada fina



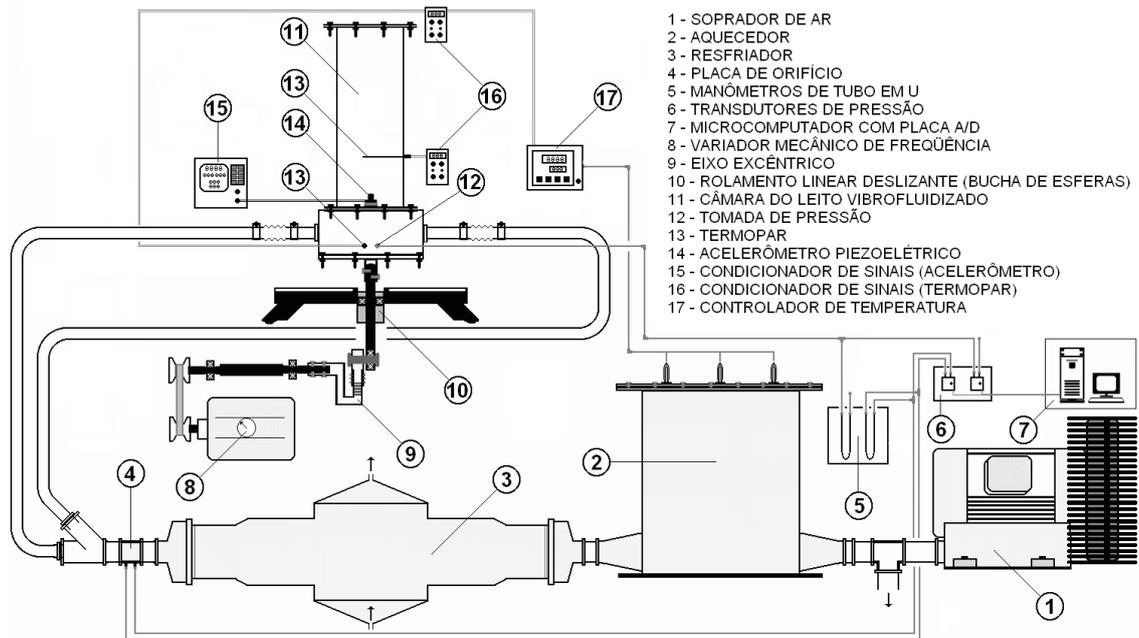
Fonte: Oliveira Junior, 2003

O ar de secagem é admitido pelo sistema através do soprador (1) de 0,75 HP, e a vazão alimentada é regulada por duas válvulas do tipo gaveta (V_1) e (V_2) e atravessa uma placa de duplo orifício que está conectada a um manômetro de água em U (2) usado para medir a vazão de ar alimentado através da leitura da diferença de pressão. O ar é aquecido através de resistências elétricas (3) de 2500W conectadas a um variador de voltagem (4) o qual permite ajustar a temperatura através do controle de energia dissipado pelas resistências, escoando em seguida através de um duto de 5cm de diâmetro. Ao final desta tubulação havia uma expansão cônica usada para aumentar o diâmetro da tubulação para 10,0 cm onde então um sistema distribuidor foi inserido, o qual era constituído por um leito fixo de 3,0 cm de espessura com esferas de vidro ($d_p = 2,8\text{mm}$), preso entre duas telas metálicas. O ar alimenta a célula de secagem de geometria cilíndrica de 9,6 cm de diâmetro e 1 cm de espessura, percolando o leito de partículas de alumina onde ocorre transferência de calor do fluido para as partículas e de massa das partículas pra o fluido.

3.2.2 Secador de leito vibrofluidizado

O equipamento utilizado para secagem em leito vibrofluidizado está representado esquematicamente através da Figura 3.2.

Figura 3.2: Equipamento para a secagem em leito vibrofluidizado



Fonte: Daleffe, 2005

O ar é fornecido ao sistema através de um soprador radial IBRAM de 7,5 cv. O ar passa por uma válvula *by-pass* que auxilia no ajuste de vazão. A vazão de ar é obtida pela queda de pressão monitorada através de uma placa de orifício (4), calibrada usando um Venturi como padrão ($Q = 0,09587\sqrt{\Delta h}$, com Q em m³/min e Δh em cm de água), e ligado a um manômetro de coluna em U com água (5).

A temperatura do ar injetado no sistema é mantida constante por meio de um aquecedor a resistências elétricas (2), que estão ligadas a um controlador de temperatura (17). Para auxiliar no controle da temperatura, principalmente em dias muito quentes, é necessário um resfriador de água (3), o qual compensa o aquecimento natural do ar provocado pelo soprador e pelo atrito do ar na tubulação. O ar atmosférico fornecido pelo soprador foi injetado no pleno em contracorrente por meio de duas entradas do leito abaixo da placa distribuidora com o objetivo de homogeneizá-lo. A placa distribuidora apresenta espessura de 2×10^{-3} m com furos de $0,8 \times 10^{-3}$ m de diâmetro, resultando em uma área livre de aproximadamente 50%.

O leito vibrofluidizado é composto por uma câmara de vidro com dimensões de 0,114m diâmetro, 0,500m de altura e 0,003m de espessura. Há dois termopares tipo J (13) com bainha de 0,005m para monitorar a temperatura.

As vibrações são impostas na câmara do leito por uma haste ligada a um eixo excêntrico (9), que converte o movimento rotacional produzido pelo motor WEG de 0,5 HP para o movimento senoidal vertical no leito. Este motor possui um variador de velocidade Ringcogne modelo RXM-750 (8) que possibilita obter a frequência desejada que era monitorada com um tacômetro óptico Minipa MTD-2244A. A amplitude da vibração era ajustada manualmente no próprio mecanismo excêntrico. A aceleração, a velocidade e o deslocamento com o qual o sistema reage a vibração imposta, são medidas através de um acelerômetro piezelétrico Brüel&Kjaer 4371 (14), o qual envia sinal para um amplificador de sinais Brüel&Kjaer 2525 (15) previamente ajustado ao acelerômetro, informando os valores na escala de amplitude em RMS ou de 0 a pico, diretamente. O sistema vibracional está colocado em uma base independente da mesa que detém a célula de medida, a fim de evitar que vibrações exercidas pelo motor influenciem o leito.

3.3 Metodologia Experimental

3.3.1 Cinética da secagem em estufa

Para determinação da cinética de secagem em estufa foi utilizado o equipamento descrito no item 3.2.1. Antes de iniciar o experimento de cinética de secagem as partículas de alumina foram umidificadas por imersão em água por um período de três horas. Após este tempo, o material ficou disposto em um recipiente perfurado e aberto para o ambiente por um período de duas horas, até que a umidade em excesso fosse removida.

As temperaturas utilizadas foram de 70,100 e 120°C a fim de comparar a cinética de secagem abaixo e acima da temperatura de ebulição da água. Os experimentos foram feitos em triplicata utilizando uma estufa com controle automático de temperatura, e as amostras com aproximadamente 100g cada, foram colocadas em três placas de Petri e então pesadas em uma balança analítica inicialmente em intervalos de cinco minutos com o auxílio de um cronômetro. No

decorrer do experimento, à medida que a variação de massa diminuía, os intervalos de pesagem foram aumentados para intervalos de dez, vinte e sessenta minutos, até que não houvesse variação significativa de massa do material.

3.3.2 Cinética da secagem em camada fina

As partículas de alumina foram umidificadas por imersão em água por um período de três horas, depois ficaram dispostas em um recipiente perfurado e aberto para o ambiente para um período de duas horas para eliminar o excesso de água.

Antes de iniciar o processo de secagem, o conjunto de resistências e o soprador foram ligados até que o sistema atingisse a velocidade e a temperatura do ar de secagem estipuladas para cada experimento, aguardando a estabilização do sistema. As amostras foram inseridas na célula de secagem, pesadas e então acopladas ao secador dando início ao processo de secagem. Em intervalos de tempo pré-determinados e com auxílio de um cronômetro, a célula de secagem foi retirada do leito para ter sua massa aferida em uma balança analítica da marca Gehaka do modelo BG 400 com precisão de 1×10^{-3} g. No decorrer do experimento, a medida que a variação de massa diminuía, os intervalos foram aumentados até que a variação de massa do material não fosse significativa.

Os experimentos de secagem em camada fina foram feitos para velocidade e temperatura do ar de secagem de 1, 2 e 3m/s e 60, 70, 80, 100 e 120°C.

3.3.3 Fluidodinâmica do leito vibrofluidizado

As caracterizações do comportamento fluidodinâmico das partículas de alumina de 5,66mm de diâmetro foram realizadas em um leito de geometria cilíndrica descrita no item 3.2.2 em duas situações distintas. Na primeira não havia a imposição da vibração (leito fluidizado), na segunda foi imposta uma vibração no sistema (leito vibrofluidizado). Para a definição das condições vibracionais, foram feitos testes preliminares, priorizando a estabilidade estrutural, melhorando a qualidade dos dados, através da diminuição da oscilação da queda de pressão do leito e prevenindo também danos ao equipamento. Desta forma, foi definido o adimensional de vibração igual a 4, onde duas diferentes combinações de amplitude

e frequência foram feitas, sendo estas iguais a A: 0,003m e f: 18,2Hz e também A: 0,021m e 6,8Hz. A altura do leito de partículas foi 0,08m e a velocidade superficial do ar variou de 0 a 1m/s.

Representadas pela variação da queda de pressão do leito em função da velocidade superficial do ar, as curvas características foram obtidas utilizando a metodologia clássica proposta por Bratu e Jinescu (1971). As medidas da queda de pressão no leito e na placa de orifício foram feitas por manômetros em “U” para vazões decrescentes de ar até zero.

3.3.4 Cinética da secagem em leito vibrofluidizado

Neste procedimento as partículas também foram umidificadas por imersão em água por um período de três horas e então ficaram dispostas em um recipiente perfurado para eliminar o excesso de água.

Os procedimentos experimentais foram divididos em duas etapas, onde na primeira etapa o equipamento foi ligado e configurado para as condições operacionais desejadas, sendo elas de $\Gamma = 4$ para combinações de amplitude e frequência de A: 0,003m e f: 18,2 Hz e A: 0,021m e 6,8 Hz. A altura do leito foi de 0,08m, temperatura do ar de 70, 80 e 100°C e velocidade do ar de secagem de $0,8U_{mvf}$, $1,0U_{mvf}$ e $1,2U_{mvf}$. A condição de $\Gamma = 4$ foi escolhida devido ao fato de que, no trabalho Meili (2009), foi o valor para o qual melhor se pôde observar comportamentos distintos do leito vibrofluidizado para um mesmo adimensional de vibração, obtido através de diferentes combinações de amplitude e frequência.

Na segunda parte, depois de atingidas condições de regime estacionário, as partículas foram inseridas na câmara de secagem até que as partículas atingissem uma altura de 7cm. Em intervalos de tempos pré-determinados, estipulado por um teste preliminar de cinética de secagem, foram retiradas do leito, com o auxílio de haste de ferro com recipiente na extremidade, amostras de aproximadamente 12g, para pesagem e então determinação da umidade do material feita pelo método direto da estufa, a 105°C $\pm 3^\circ\text{C}$, por 24 horas. As pesagens foram feitas em uma balança analítica AND FR-200 MK-II com precisão de 10^{-4}g .

3.4 Critério para verificação de reprodutibilidade dos dados

As repetições dos dados de cinética de secagem foram linearizadas através da equação (24) de acordo com método utilizado por Arrieche (2003).

$$YR = a YR_r \quad (24)$$

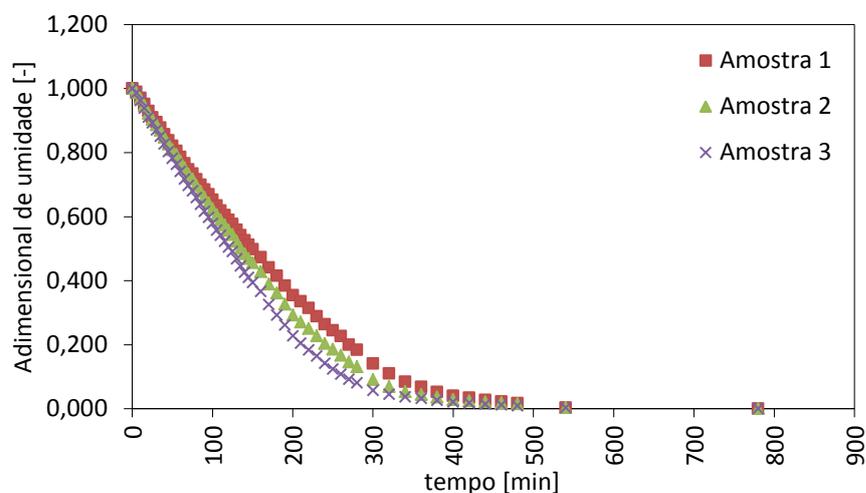
A reprodutibilidade é verificada pelo parâmetro “a” próximo a 1, assegurado estatisticamente pelo desvio padrão (entre os pontos experimentais e as respectivas réplicas), teste t (razão entre o parâmetro a e o desvio padrão) e a variância explicada (% de pontos explicados pela repetição).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Cinética da secagem em estufa

Os experimentos de secagem em estufa foram feitos em triplicatas, conforme mostra resultado representado pela Figura 4.1 onde tem-se o adimensional de umidade em função do tempo para temperatura do ar de 70°C.

Figura 4.1: Cinética de secagem em estufa para temperatura de 70°C



Fonte: Autor, 2015

A reprodutibilidade dos dados da Figura 4.1 pode ser constatada tanto visualmente, face a proximidade dos dados de umidade adimensional em função do tempo de secagem, quanto pelo bom ajuste do modelo estatístico utilizado por Arrieche (2003) para verificar a reprodutibilidade dos dados. Para os dados da Figura 4.1 tem-se $a=0,9407$, desvio padrão de 0,2795, teste-t de 3,555, coeficiente de correlação de 0,9935 e variância explicada de 98,71.

No geral, verifica-se que o valor estimado do parâmetro “a” e o coeficiente de correlação são de aproximadamente igual a uma unidade. Ainda nota-se, pelo alto índice de variância explicada, que segundo Arrieche (2003) mostra a percentagem de validade dos dados obtidos pelo modelo estatístico, a boa reprodutibilidade dos dados experimentais.

Os dados para as temperaturas de 100°C e 120°C tiveram um comportamento similar, como está apresentado na Tabela 4.1.

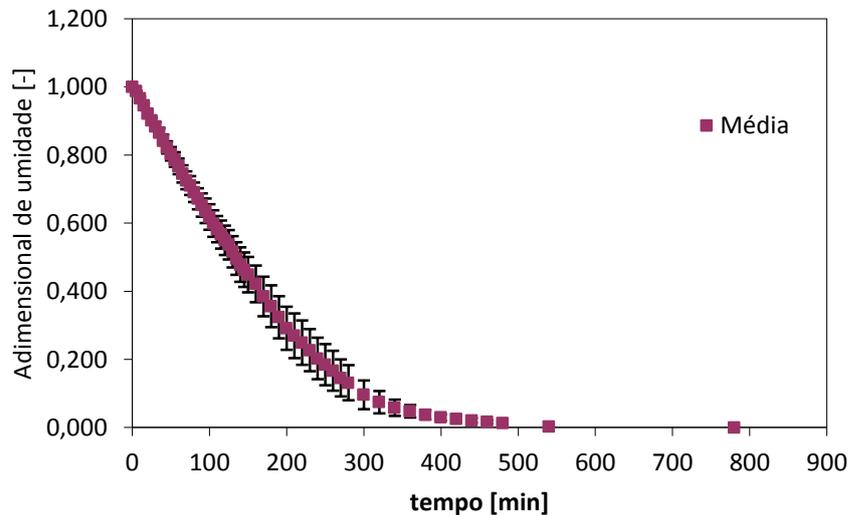
Tabela 4.1: Parâmetros estatísticos da regressão linear para verificação da reprodutibilidades dos dados para secagem em estufa

Temperatura [°C]	Parâmetro adimensional	Desvio padrão	Teste-t	Coefficiente de correlação	Variância explicada
70°C	0,9407	0,2795	3,555	0,9935	98,71
100°C	0,9624	0,2806	3,558	0,9982	99,64
120°C	0,9928	0,2912	3,432	0,9995	99,90

Fonte: Autor, 2015

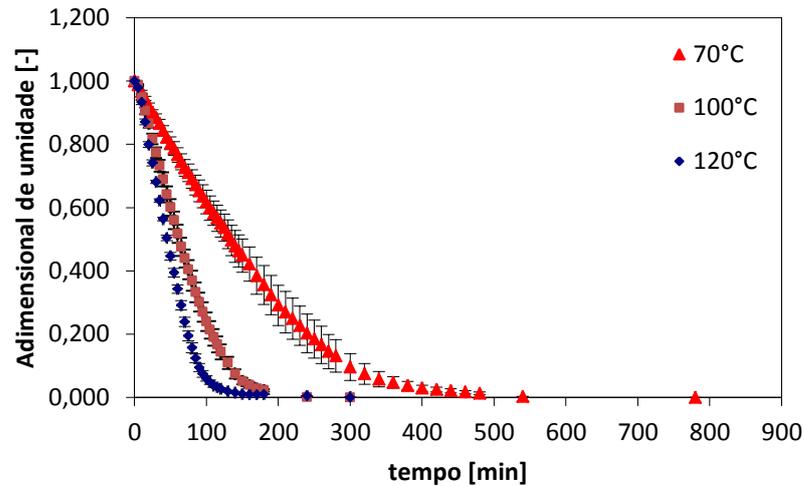
Para ter maior clareza, os resultados das tréplicas são apresentados na forma de valores médios com a indicação dos desvios, na Figura 4.2.

Figura 4.2: Média de cinética de secagem em estufa para temperatura de 70°C



Fonte: Autor, 2015

A partir da constatação da reprodutibilidade dos dados, iniciou-se o estudo da cinética de secagem utilizando partículas de alumina seguindo o mesmo procedimento. Conforme mostra a Figura 4.3, o experimento foi realizado com temperaturas de 70,100 e 120°C.

Figura 4.3: Cinética de secagem em estufa

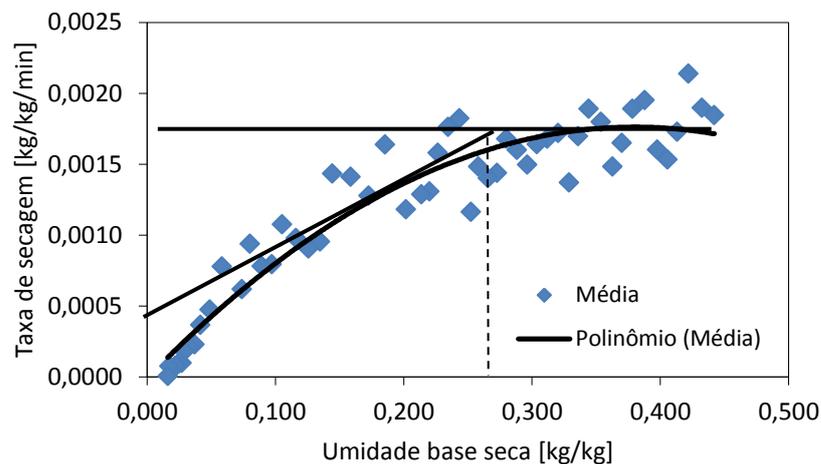
Fonte: Autor, 2015

Conforme pode ser observado pelos resultados experimentais apresentados na Figura 4.3, a diferença entre as curvas para as temperaturas de 70 e 100°C foi muito maior do que a observada entre as temperaturas de 100 e 120°C, indicando que a influência da temperatura diminui à medida que a temperatura aumenta. Observação esta que pode ser explicada pelo fato de que para 70°C todo calor fornecido pelo sistema é utilizado somente como calor sensível. Para a temperatura de 100°C a energia fornecida pelo ar é transferida como calor sensível e também como calor latente, havendo então mudança de fase da água do estado líquido para o gasoso, favorecendo a remoção de umidade, logo a cinética de secagem fica mais rápida, o mesmo acontece para temperatura de 120°C, porém agora a diferença para a de 100°C não é tão marcante.

Com os dados experimentais obtidos durante o experimento foi calculada a umidade adimensional em função do tempo, a curva de Krischer e a taxa de secagem em função do tempo. Como citado no item 2.5, o período de taxa constante termina quando o material atinge a umidade crítica, o qual pode ser determinado pelo método gráfico utilizando a curva de Krischer. Apresentado na Figura 4.4, a curva de Krischer é obtida através da taxa de secagem em função da umidade em base seca do material. Após obtenção dos dados experimentais foi feito um ajuste através da “Curva de Tendência” do MS Excel a qual ajusta um polinômio aos pontos experimentais. Proposto por Keey (1978), o método gráfico é então utilizado para determinação da umidade crítica. De acordo com método, o valor

encontrado para umidade crítica neste experimento é de aproximadamente 0,26. Visualiza-se também no gráfico o valor da taxa de secagem constante que é de aproximadamente 0,00175 kg H₂O/kg sólido seco/min.

Figura 4.4: Curva de Krischer para secagem em estufa e temperatura de 70°C



Fonte: Autor, 2015

Após determinado o período de taxa constante, o período de taxa de secagem decrescente foi ajustado a cinco equações semiempíricas diferentes mais comumente utilizados na literatura, sendo eles: Lewis (1929), Brooker et al. (1974), Henderson & Henderson (1968), Page (1969) e Overhults et al. (1975) onde foi utilizado o método da soma dos mínimos quadrados para ajuste das curvas. Através dos valores de SQR, r e r^2 nota-se que as curvas que melhor se ajustaram aos pontos experimentais foram as originadas dos modelos de Page (1945) e Overhults et al (1975), conforme dados apresentados na Tabela 4.2.

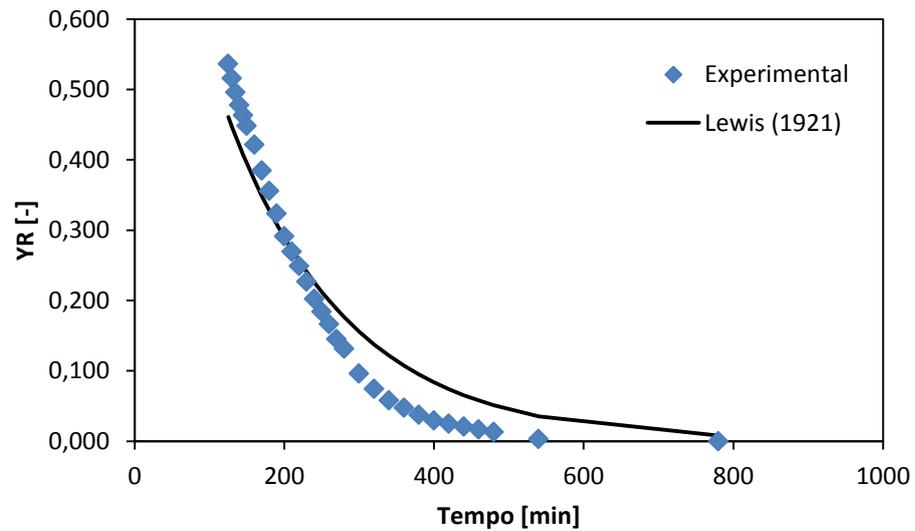
Tabela 4.2: Ajuste dos dados experimentais para secagem em estufa para temperatura de 70°C

Modelo	SQR	r	r²
Lewis (1921)	0,0653	0,9938	0,9877
Brooker et al. (1974)	0,0053	0,9977	0,9953
Henderson & Henderson (1968)	0,0560	0,9942	0,9885
Page (1949)	0,0008	0,9996	0,9992
Overhults et al. (1973)	0,0008	0,9996	0,9992

Fonte: Autor, 2015

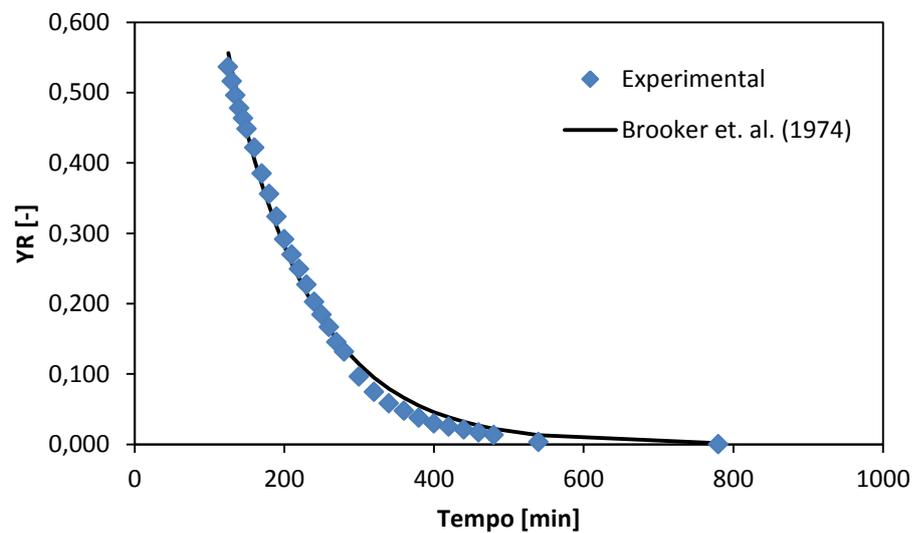
A comparação feita entre os valores obtidos experimentalmente para temperatura de ar de secagem de 70°C e os previstos pelas equações da Tabela 4.2 estão representados nas figuras Figura 4.5 a Figura 4.9, sendo possível, desta forma confirmar o bom ajuste apresentado pelos modelos de Page (1949) e Overhults et al. (1975).

Figura 4.5: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Lewis (1921)- estufa temperatura de 70°C



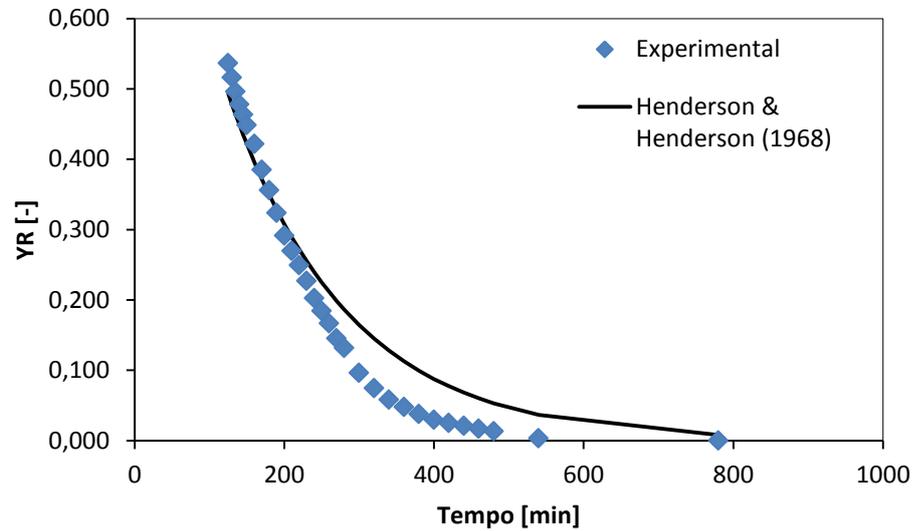
Fonte: Autor, 2015

Figura 4.6: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Brooker et al. (1974) - estufa temperatura de 70°C



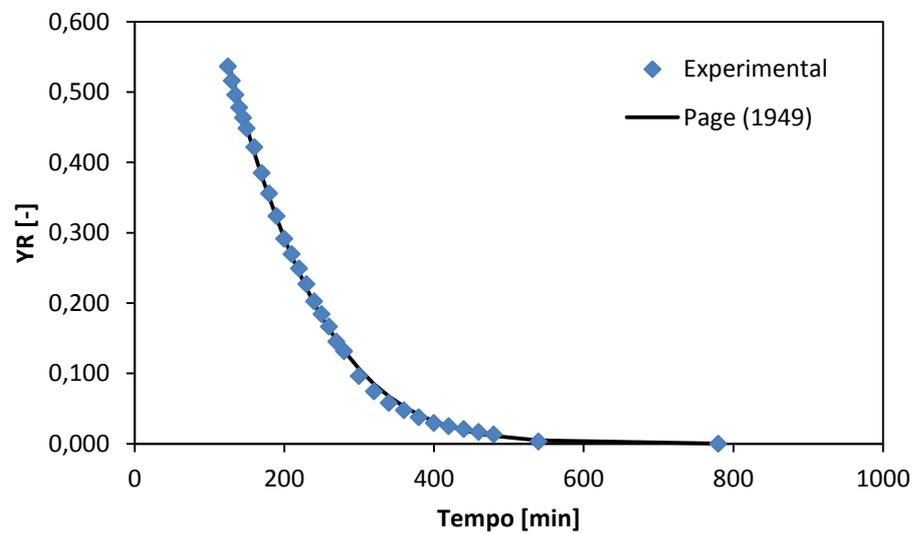
Fonte: Autor, 2015

Figura 4.7: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Henderson & Henderson (1968) - estufa temperatura de 70°C



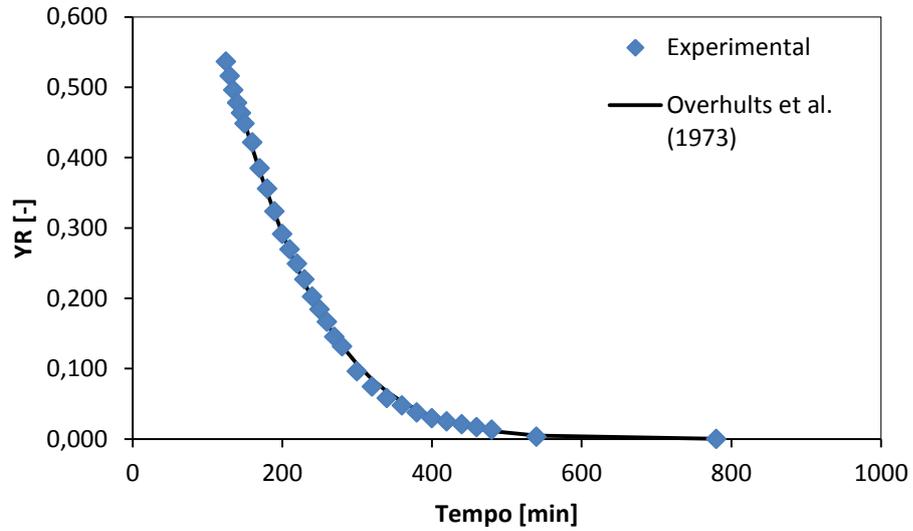
Fonte: Autor, 2015

Figura 4.8: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Page (1949) - estufa temperatura de 70°C



Fonte: Autor, 2015

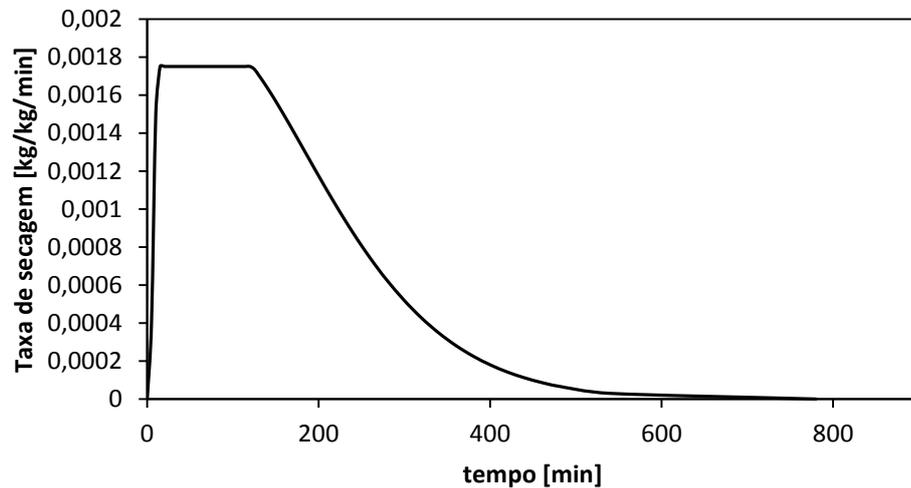
Figura 4.9: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Overhults et al. (1973) - estufa temperatura de 70°C



Fonte: Autor, 2015

Na Figura 4.10, está representada a curva da taxa de secagem do material em função do tempo.

Figura 4.10: Taxa de secagem em função do tempo para secagem em estufa e temperatura de 70°C



Fonte: Autor, 2015

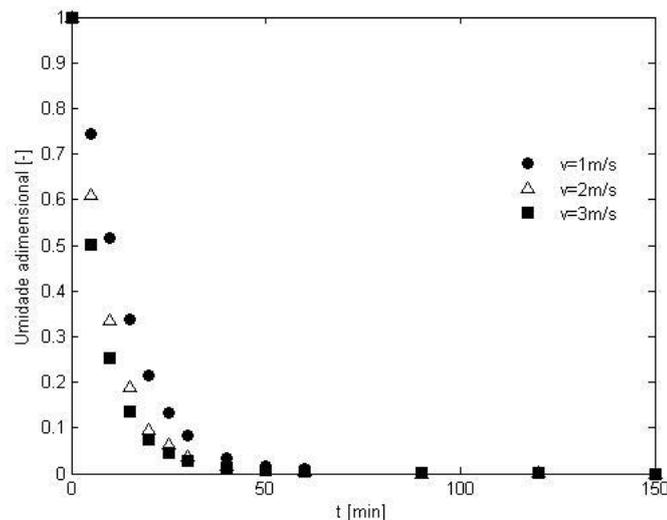
Inicialmente, período em que taxa de secagem aumenta em função do tempo, nota-se o período de aquecimento, onde a temperatura do material é mais baixa que a temperatura do ar de secagem e, a pressão parcial de vapor da água na superfície

do material é insignificante. Em seguida verifica-se o período de taxa constante de secagem, onde o calor cedido pelo ar é utilizado na evaporação da água na superfície. Vale a pena ressaltar também que nesse período a temperatura do material é constante. Atingindo a umidade crítica tem-se a taxa de secagem decrescente onde a difusão controla o processo, pois a velocidade com que a água migra do interior para a superfície é menor do que a velocidade de evaporação da água na superfície. Quando o material atinge a umidade do ar de secagem a taxa torna-se nula. Embora as figuras não tenham sido apresentadas para não ser repetitivo, os dados para temperatura de 100 e 120°C tiveram comportamento similar aos dados da temperatura de 70°C.

4.2 Cinética de secagem em camada fina

A Figura 4.11 apresenta a cinética de secagem da alumina à temperatura de 70°C no secador de leito fixo. Observa-se que a umidade do material decresce ao decorrer do tempo, fato mais que esperado. Verifica-se que a velocidade do ar de secagem apresentou influência significativa na cinética de secagem comparando-se velocidades de 1m/s e 2 m/s.

Figura 4.11: Cinética de secagem para temperatura do ar de 70°C e velocidades de 1, 2 e 3m/s



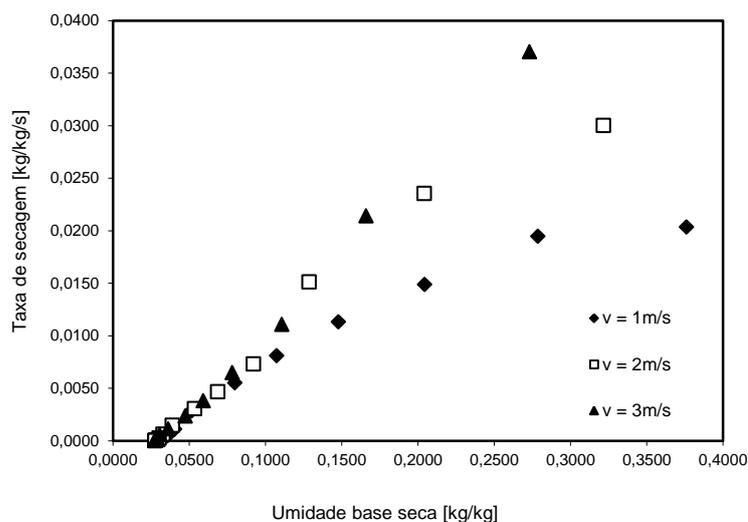
Fonte: Autor, 2015

Tal fato pode ser explicado pela existência de uma camada limite junto à partícula sólida. Quanto menor a velocidade do ar, maior será a espessura da camada limite, o que, conseqüentemente, aumentará a resistência externa à transferência de calor e massa. À medida que se aumenta a velocidade do ar a camada limite tende a diminuir, diminuindo também a resistência externa.

Ao comparar as cinética de secagem para as velocidades do ar de 2m/s e 3m/s, verifica-se menor influência da velocidade do ar de secagem, pois a uma dada velocidade a diminuição da espessura da camada limite já não é mais muito significativa. Esse fato é bem explicado na literatura até mesmo em livro didáticos de Fenômenos de Transporte (Bird et al., 2004)

Na Figura 4.12, tem-se a taxa de secagem em função da umidade em base seca, para temperatura de 70°C.

Figura 4.12: Curva de Krischer para temperatura do ar de 70°C e velocidades de 1, 2 e 3m/s



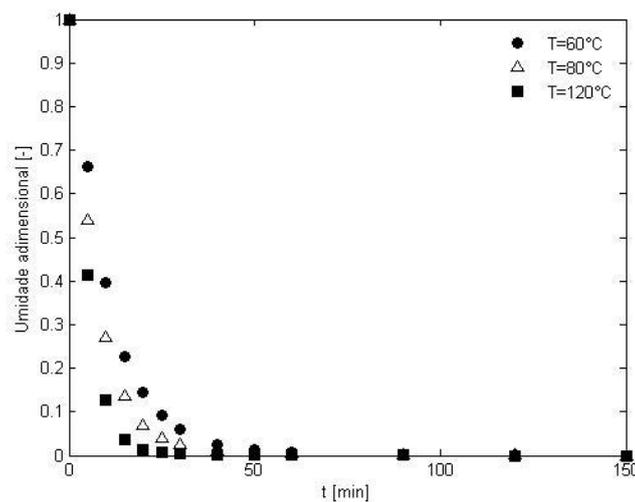
Fonte: Autor, 2015

Para a velocidade do ar de secagem de 1m/s, nota-se o período de taxa de secagem constante, onde o calor fornecido pelo ar é primeiramente utilizado para evaporar toda a água superficial das partículas de alumina. Somente após a evaporação da água superficial, inicia-se o período de taxa de secagem decrescente. Ao comparar as curvas referentes à velocidade do ar secagem de 2 e 3m/s nota-se que a evaporação da água superficial foi suficientemente rápida para, que na primeira pesagem da amostra, o período de taxa de secagem constante já houvesse terminado. Nota-se ainda que após esse período as curvas são quase

coincidentes, o que mais uma vez indica que para este período somente as características do material influenciam no processo.

A Figura 4.13 representa a cinética de secagem com velocidade de 2m/s a temperaturas de 60, 80 e 120°C respectivamente. Observa-se que a temperatura do ar de secagem apresentou influência pouco significativa no processo de secagem, comparadas à secagem de grãos e sementes onde a cinética de secagem é fortemente influenciada pela temperatura. A ocorrência deste fenômeno ainda não é bem explicada pela literatura, fato que ainda deverá ser melhor estudado futuramente para que haja uma compreensão embasada nos fenômenos de transferência. Possivelmente este fato está ligado à estrutura interna das partículas, como por exemplo a sua distribuição e tamanho dos poros e a tortuosidade do meio.

Figura 4.13: Cinética de secagem para velocidade do ar de 2m/s e temperatura de 60, 80 e 120°C

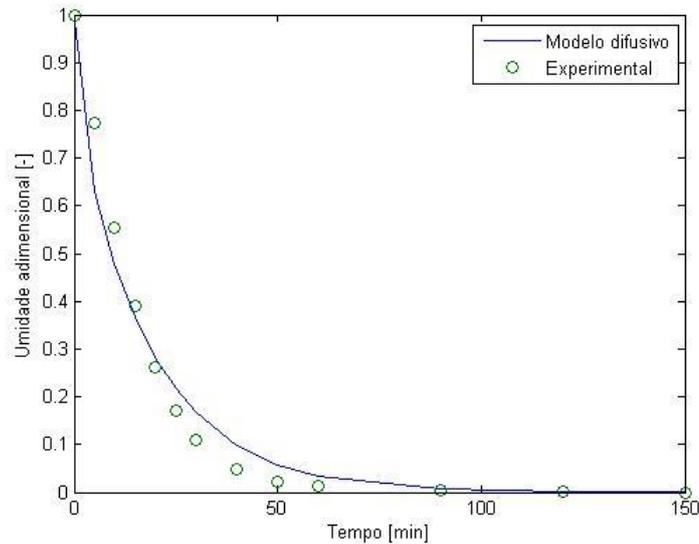


Fonte: Autor, 2015

Os dados experimentais foram usados para verificação do modelo difusivo, de modelos semiempíricos e também foram utilizados para o treinamento de uma rede neural.

Inicialmente será apresentada a verificação do modelo difusivo utilizando a C.C.2(a) para condição de temperatura e velocidade do ar de secagem de 60°C e 1m/s respectivamente, conforme mostra Figura 4.14.

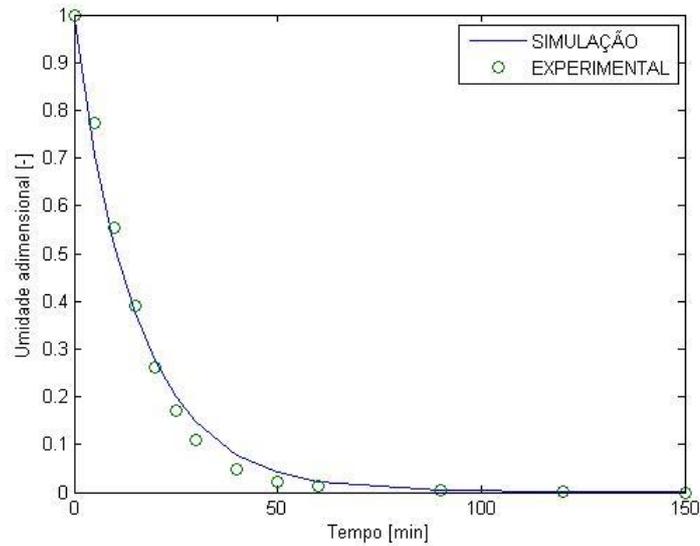
Figura 4.14: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente em camada fina para temperatura e velocidade do ar secagem de 60°C e 1m/s, respectivamente e previstos pelo modelo difusivo utilizando C.C.2(a)



Fonte: Autor, 2015

O ajuste feito para a Figura 4.14 foi feita utilizando a C.C. 2(a) utilizando 1000 termos da série, e considera que se estabelece equilíbrio instantâneo na superfície do material, conforme a condição de contorno apresentada na equação (16). Como pode ser verificado pela figura, nestas condições o modelo não apresentou bom ajuste aos dados experimentais, visto que no início do processo a umidade adimensional foi subestimada e aproximadamente após vinte minutos de secagem os dados foram superestimados pelo modelo. Tal fato já era esperado, pois conforme mostra Figura 4.12, para baixa velocidade do ar de secagem há presença de período de taxa de secagem constante, o qual indica que o fenômeno de convecção deva ser considerado, condição de contorno esta representada pela C.C.2(b). Desta forma foi feito um novo ajuste do modelo difuso aos dados experimentais, o qual está representado pela Figura 4.15. É possível visualizar na figura que os valores previstos pelo modelo ainda estão subestimados no início e superestimados no final do processo respectivamente, porém com desvios menores em relação dos dados da Figura 4.14.

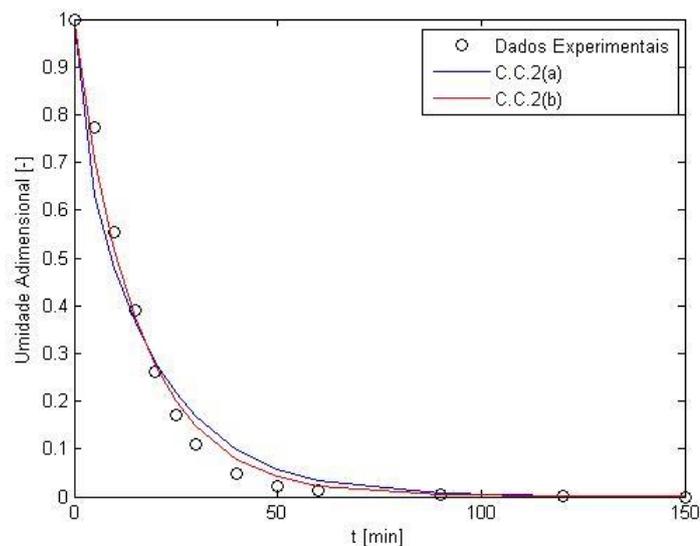
Figura 4.15: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente em camada fina para temperatura e velocidade do ar secagem de 60°C e 1m/s, respectivamente e previstos pelo modelo difusivo utilizando C.C.2(b)



Fonte: Autor, 2015

A Figura 4.16 representa a comparação dos dados experimentais e valores previstos pelo modelo difusivo considerando as C.C.2(a) e C.C.2(b).

Figura 4.16: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente em camada fina para temperatura e velocidade do ar secagem de 60°C e 1m/s, respectivamente e previstos pelo modelo difusivo utilizando C.C.2(a) e C.C.2(b)



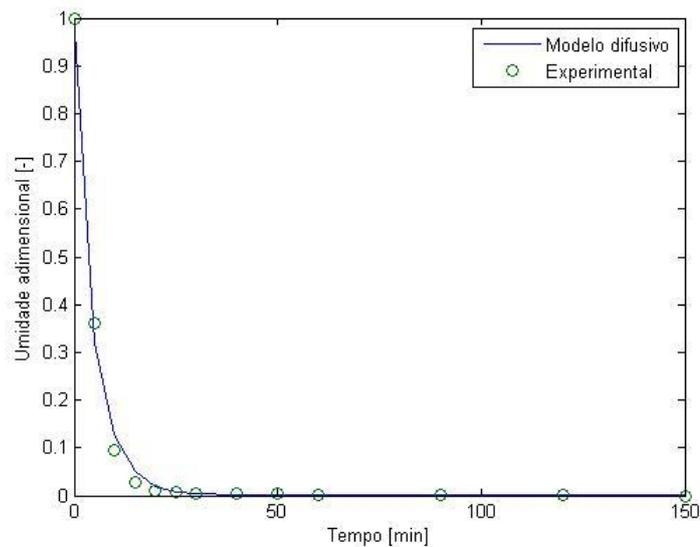
Fonte: Autor, 2015

Conforme pode ser verificado pela Figura 4.16, os dados previstos pelo modelo utilizando a C.C.2(b) representa melhor os dados experimentais, pois as

hipóteses consideradas estão mais próximas a realidade física do processo. O desvio ainda apresentado pelo modelo pode estar relacionado ao fato do modelo considerar a difusão efetiva como uma propriedade constante ao longo do processo, conforme já verificado por Perazzini (2014).

É apresentada na Figura 4.17 a verificação do modelo difusivo utilizando a C.C.2(a) para condição de temperatura e velocidade do ar de secagem de 120°C e 3m/s respectivamente. Conforme pode ser verificado, as considerações utilizadas são capazes de descrever bem o processo de secagem para as condições apresentadas. Isto indica que a consideração feita, de que o equilíbrio é atingido instantaneamente na superfície do material é válida.

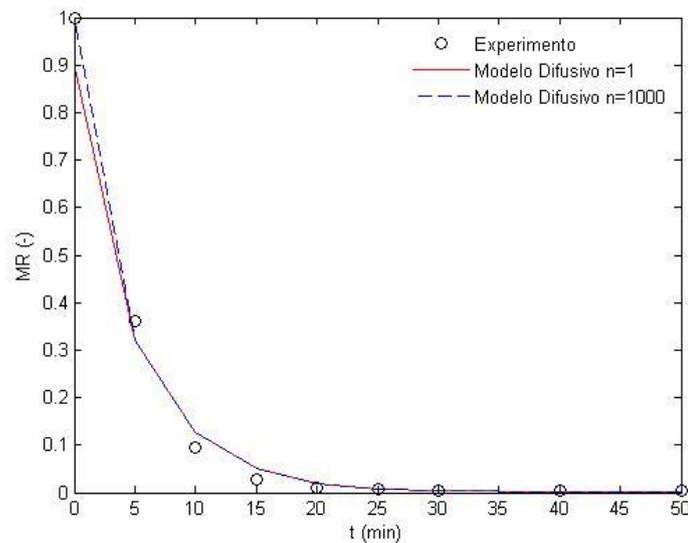
Figura 4.17: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente em camada fina para temperatura e velocidade do ar secagem de 120°C e 3m/s, respectivamente e previstos pelo modelo difusivo utilizando C.C.2(a)



Fonte: Autor, 2015

No ajuste do modelo difusivo apresentado na Figura 4.17, foi utilizada a equação (19) e série foi resolvida com $n=1000$. Porém, conforme observado por Perazzini (2014), o número de termos utilizados na resolução da série apresenta resultados diferentes, diferença esta que pode ser visualizada na Figura 4.18 onde para a resolução da série foram utilizados $n=1$ e $n=1000$.

Figura 4.18: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previsto pelos modelos de modelo difusivo utilizando a C.C.2(a) com $n=1$ e $n=1000$ para secagem em camada fina para temperatura de 120°C e velocidade do ar de 3m/s



Fonte: Autor, 2015

Ao analisar os resultados da Figura 4.18 é possível verificar que no instante inicial da secagem ($t=0$) o modelo apresenta um desvio significativo dos dados experimentais ao resolver a série somente com um termo, apontando um valor da umidade adimensional próximo de 0,9 que corresponde à umidade atingida aproximadamente após um minuto do início do processo de secagem. Este resultado está incorreto fundamentalmente, visto que ao utilizar uma variável adimensionalizada em que o sólido possui a concentração máxima no início da secagem, este deveria apresentar o valor referente a uma unidade. Ao utilizar a série com mil termos o modelo representa melhor os dados experimentais, de uma maneira mais próxima a realidade erro em $t=0$ e conseqüentemente o erro é de apenas 0,02%.

Através do modelo difusivo também foi possível obter a difusividade efetiva para transferência de massa utilizando a equação (21). A solução foi obtida utilizando o software Matlab. A partir dos dados apresentados na Tabela 4.3 é possível mais uma vez confirmar a maior influência da velocidade do ar de secagem diferença entre 1 e 2 m/s respectivamente. É possível verificar também, conforme observado pelos resultados experimentais obtidos na secagem em estufa que a temperatura apresentou maior influência para mudança de temperatura entre 80 e 100°C , respectivamente. O valor da difusividade efetiva encontrada diverge em 10^2

da ordem de grandeza encontrada por Perazzini (2014), porém não foram encontrados erros o qual pudessem explicar o motivo desta variação, portanto este fato ainda deverá ser melhor estudado em trabalhos futuros.

Tabela 4.3: Difusividade efetiva prevista pelo modelo difusivo para camada fina

T[°C]	D _{eff} [m ² /s]		
	v [m/s]		
	1	2	3
60	5,40E-06	6,19E-06	6,41E-06
70	6,07E-06	7,24E-06	7,88E-06
80	7,24E-06	8,61E-06	9,04E-06
100	1,47E-05	2,01E-05	2,38E-05
120	1,89E-05	2,54E-05	2,87E-05

Fonte: Autor, 2015

Após utilização do modelo difusivo, os dados foram também ajustados aos modelos semiempíricos apresentados no item 2.7.1, onde foi utilizado o método da minimização do quadrado dos resíduos para ajuste das curvas. Por apresentarem valor de r^2 mais próximos de 1 e menores SQR e EQM nota-se que as curvas que melhor se ajustaram aos pontos experimentais em todas as condições experimentais foram as originadas dos modelos de Page (1945) e Overhults et al (1975), conforme dados apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Resultados estatísticos para ajuste dos modelos empíricos aos dados experimentais para cinética de secagem em camada fina

Temperatura	Velocidade (m/s)	Modelo	r^2	SQR	EQM
60°C	1	Lewis	0,9966	0,0065	4,97E-04
		Brooker et al	0,9964	0,0051	3,90E-04
		Henderson & Henderson	0,9964	0,0051	3,90E-04
		Page	0,9999	0,0001	6,85E-06
		Overhults et al.	0,9999	0,0001	6,85E-06
	2	Lewis	0,9986	0,0017	1,34E-04
		Brooker et al	0,9987	0,0015	1,18E-04
		Henderson & Henderson	0,9987	0,0015	1,18E-04
		Page	0,9995	0,0007	5,22E-05
		Overhults et al.	0,9995	0,0007	5,22E-05
	3	Lewis	0,9996	0,0005	3,93E-05
		Brooker et al	0,9997	0,0005	3,65E-05

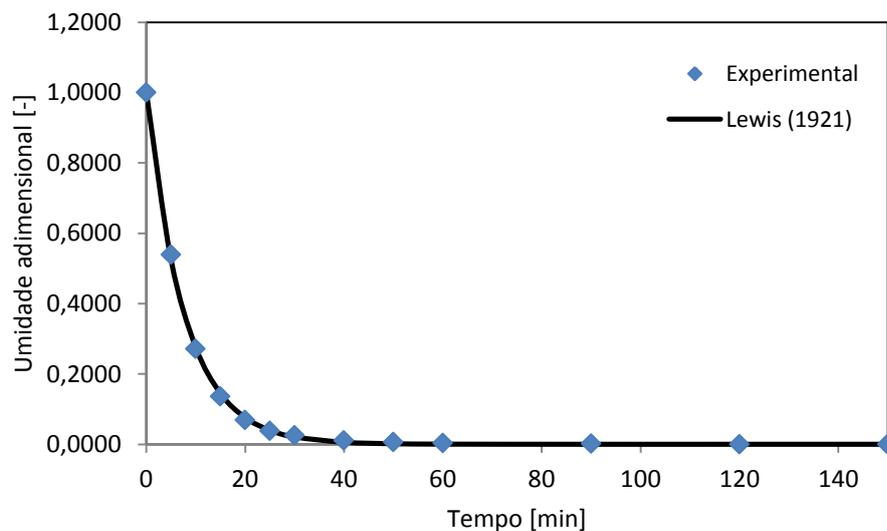
		Henderson & Henderson	0,9997	0,0005	3,65E-05
		Page	0,9999	0,0002	1,33E-05
		Overhults et al.	0,9999	0,0002	1,33E-05
70°C	1	Lewis	0,9965	0,0061	4,69E-04
		Brooker et al	0,9964	0,0049	3,81E-04
		Henderson & Henderson	0,9964	0,0049	3,81E-04
		Page	0,9999	0,0001	7,16E-06
		Overhults et al.	0,9999	0,0001	7,48E-06
	2	Lewis	0,9990	0,0013	9,71E-05
		Brooker et al	0,9990	0,0011	8,84E-05
		Henderson & Henderson	0,9990	0,0011	8,84E-05
		Page	0,9997	0,0004	3,02E-05
		Overhults et al.	0,9997	0,0004	3,02E-05
	3	Lewis	0,9997	0,0005	3,88E-05
		Brooker et al	0,9997	0,0005	3,77E-05
		Henderson & Henderson	0,9997	0,0005	3,77E-05
		Page	0,9999	0,0002	1,34E-05
		Overhults et al.	0,9999	0,0002	1,34E-05
80°C	1	Lewis	0,9960	0,0062	4,79E-04
		Brooker et al	0,9959	0,0053	4,06E-04
		Henderson & Henderson	0,9959	0,0053	4,06E-04
		Page	0,9999	0,0001	8,80E-06
		Overhults et al.	0,9999	0,0001	8,80E-06
	2	Lewis	0,9996	0,0004	3,34E-05
		Brooker et al	0,9996	0,0004	3,18E-05
		Henderson & Henderson	0,9996	0,0004	3,18E-05
		Page	0,9999	0,0002	1,64E-05
		Overhults et al.	0,9999	0,0002	1,64E-05
	3	Lewis	0,9999	0,0002	1,39E-05
		Brooker et al	0,9999	0,0002	1,39E-05
		Henderson & Henderson	0,9999	0,0002	1,39E-05
		Page	0,9999	0,0002	1,26E-05
		Overhults et al.	0,9999	0,0002	1,26E-05
100°C	1	Lewis	0,9932	0,0030	7,64E-04
		Brooker et al	0,9939	0,0075	5,79E-04
		Henderson & Henderson	0,9939	0,0075	5,79E-04
		Page	0,9999	0,0001	9,57E-06
		Overhults et al.	0,9999	0,0001	9,57E-06
	2	Lewis	0,9977	0,0002	2,22E-04
		Brooker et al	0,9983	0,0017	1,34E-04
		Henderson & Henderson	0,9983	0,0017	1,34E-04
		Page	0,9999	0,0002	1,45E-05
		Overhults et al.	0,9999	0,0002	1,45E-05
	3	Lewis	0,9990	0,0012	9,91E-05
		Brooker et al	0,9989	0,0012	9,47E-05

		Henderson & Henderson	0,9989	0,0012	9,47E-05
		Page	0,9990	0,0012	9,24E-05
		Overhults et al.	0,9990	0,0012	9,24E-05
120°C	1	Lewis	0,9949	0,0064	4,89E-04
		Brooker et al	0,9948	0,0060	4,62E-04
		Henderson & Henderson	0,9948	0,0060	4,62E-04
	2	Page	1,0000	0,0001	4,93E-06
		Overhults et al.	1,0000	0,0001	4,93E-06
		Lewis	0,9968	0,0001	2,80E-04
	3	Brooker et al	0,9985	0,0016	1,23E-04
		Henderson & Henderson	0,9985	0,0016	1,23E-04
		Page	0,9999	0,0001	5,13E-06
	3	Overhults et al.	0,9999	0,0001	5,13E-06
		Lewis	0,9977	0,0001	2,07E-04
		Brooker et al	0,9990	0,0010	7,57E-05
	3	Henderson & Henderson	0,9990	0,0010	7,57E-05
		Page	0,9999	0,0001	1,00E-05
		Overhults et al.	0,9999	0,0001	1,00E-05

Fonte: Autor, 2015

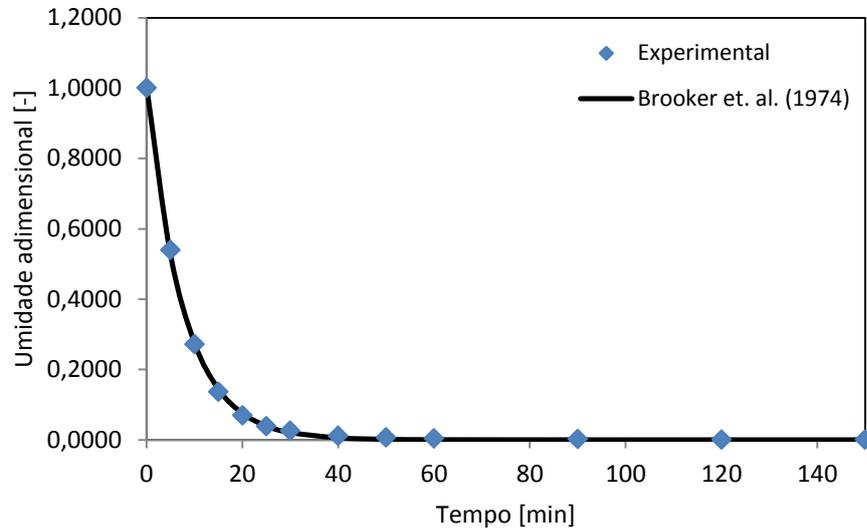
Por concisão, será apresentada da Figura 4.19 a Figura 4.23, a comparação feita entre os valores obtidos experimentalmente para temperatura e velocidade do ar de secagem de 80°C e 2m/s, respectivamente, e os valores previstos pelos modelos da Tabela 4.4.

Figura 4.19: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Lewis (1921) – camada fina temperatura e velocidade de 80°C e 2m/s respectivamente



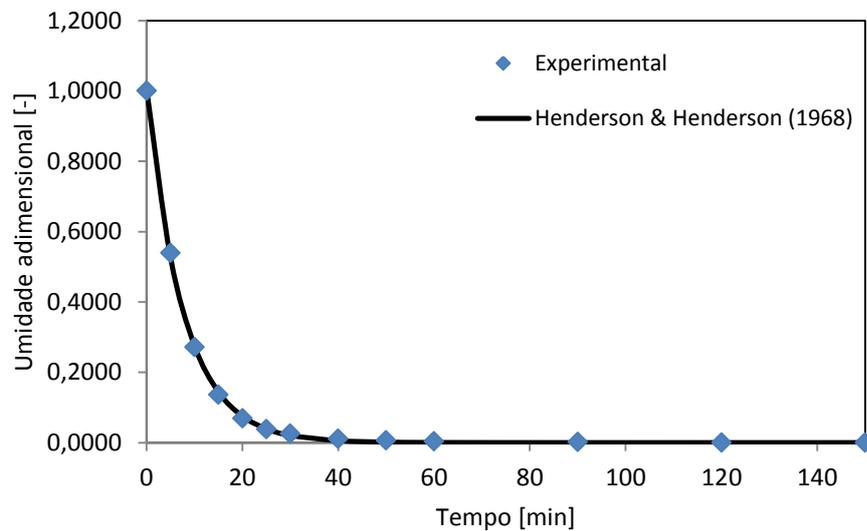
Fonte: Autor, 2015

Figura 4.20: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Brooker et al. (1974) – camada fina temperatura e velocidade de 80°C e 2m/s respectivamente



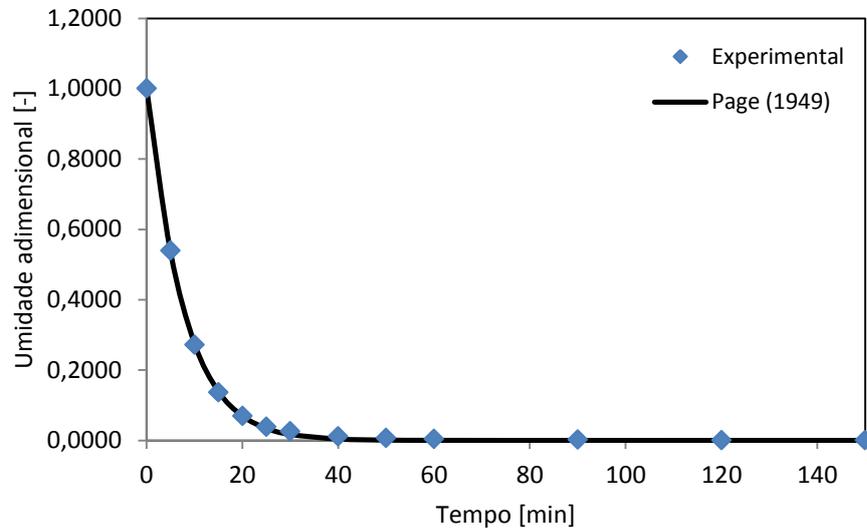
Fonte: Autor, 2015

Figura 4.21: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Henderson & Henderson (1968) – camada fina temperatura e velocidade de 80°C e 2m/s respectivamente



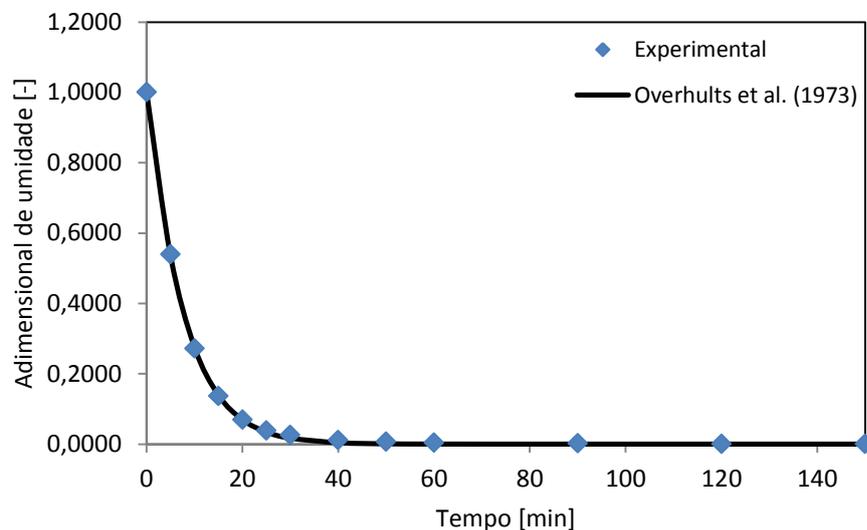
Fonte: Autor, 2015

Figura 4.22: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Page (1949) – camada fina temperatura e velocidade de 80°C e 2m/s respectivamente



Fonte: Autor, 2015

Figura 4.23: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Overhults et al. (1973) – camada fina temperatura e velocidade de 80°C e 2m/s respectivamente



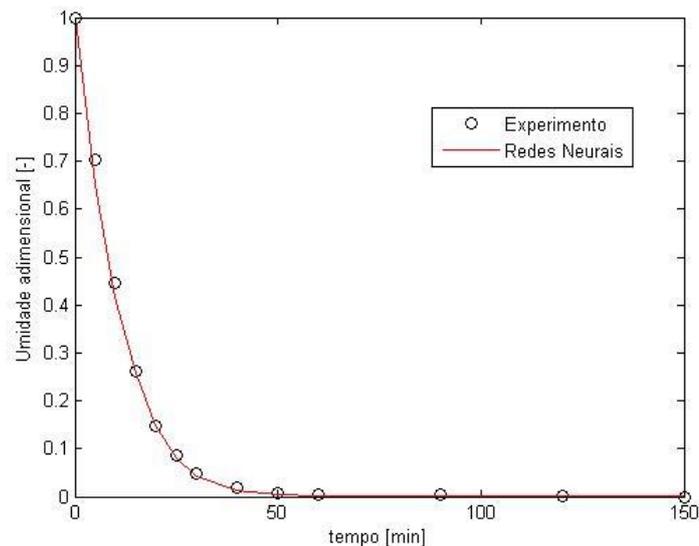
Fonte: Autor, 2015

Além da utilização do modelo difusivo e dos modelos empíricos, também foi utilizada redes neurais, a qual foi desenvolvida utilizando o comando *nftool* do software *MathworksMatlab*, que inicia uma guia de montagem de rede neural do tipo *Feedforward* cujo algoritmo padrão de minimização é o de Levenberg-Marquardt. O

método procura um mínimo local em uma função e o número de épocas é automaticamente calculado pelo *software*. Para a cinética de secagem em camada fina foi criada uma única rede neural para todo o conjunto de dados experimentais com uma camada de entrada com três neurônios onde os dados fornecidos foram o tempo de processo, temperatura e velocidade do ar de secagem. A camada intermediária possui dois neurônios e a camada de saída um neurônio. A rede foi obtida com 100 épocas. O treinamento da rede foi feito utilizando 60% das informações do banco de dados experimental e, a verificação e o teste da rede foram feitos utilizando 20% dos dados cada um respectivamente. A escolha dos dados é feita aleatoriamente pelo *software*, portanto, raramente uma mesma rede pode ser obtida mais de uma vez.

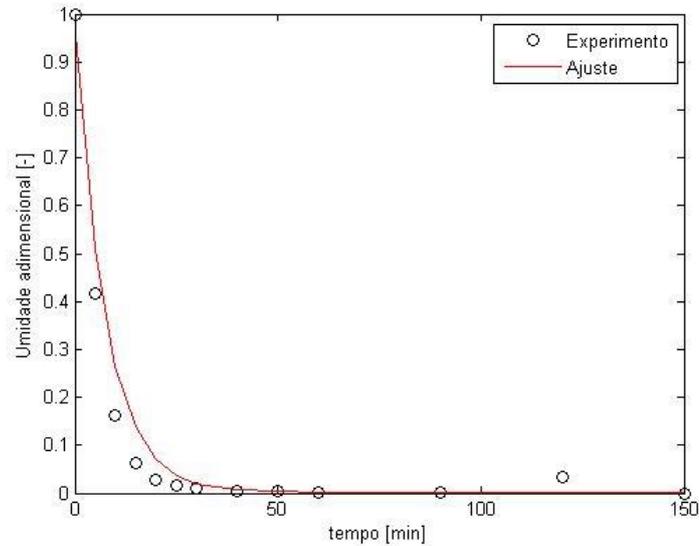
As figuras Figura 4.24, Figura 4.25 e Figura 4.26 representam os dados experimentais e os dados simulados pelo modelo das redes neurais para temperatura e velocidade de ar de secagem de 80°C e 1m/s, 100°C e 1m/s e 100°C e 3m/s respectivamente, onde é possível verificar em geral um bom ajuste aos dados experimentais.

Figura 4.24: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de redes neurais – camada fina temperatura e velocidade de 80°C e 1m/s respectivamente



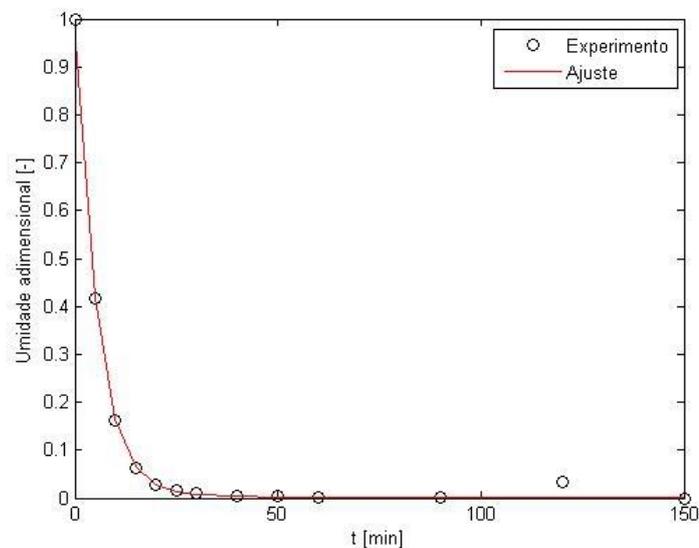
Fonte: Autor, 2015

Figura 4.25: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de redes neurais – camada fina temperatura e velocidade de 100°C e 1m/s respectivamente



Fonte: Autor, 2015

Figura 4.26: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de redes neurais – camada fina temperatura e velocidade de 100°C e 3m/s respectivamente

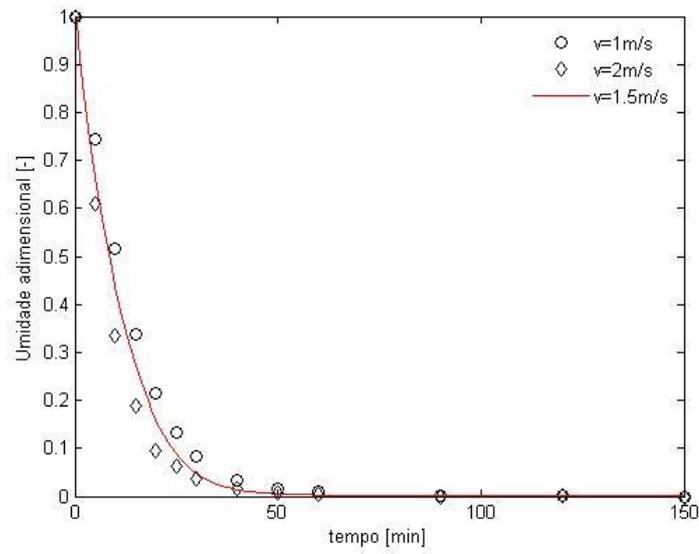


Fonte: Autor, 2015

Além da capacidade de se ajustar aos dados experimentais, a técnica de redes neurais também é capaz de simular resultados experimentais que estão entre a faixa das condições experimentais realizadas. A Figura 4.27 simula o adimensional de umidade em função do tempo de secagem para temperatura e velocidade do ar de secagem de 70°C e 1,5m/s respectivamente e a Figura 4.28 simula também o adimensional de umidade em função do tempo para temperatura e velocidade do ar

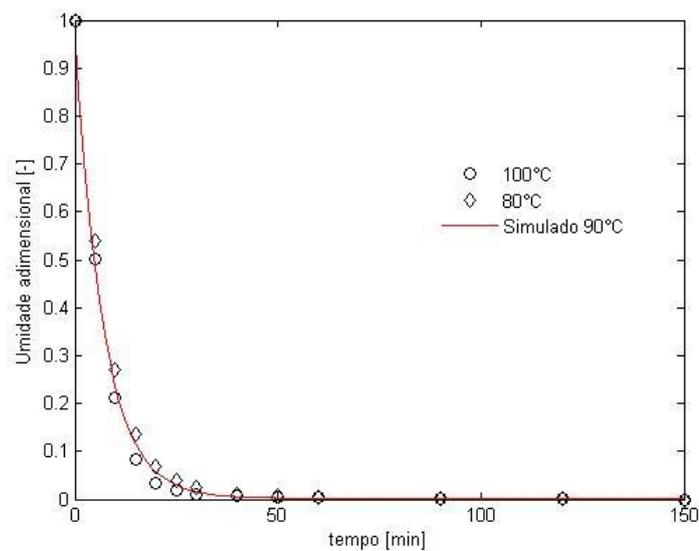
de secagem de 90°C e 2m/s respectivamente. Em ambos os casos foi possível notar que a rede neural criada apresentou boa simulação das condições experimentais estipuladas.

Figura 4.27: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente para temperatura de 70°C e velocidade do ar de secagem de 1 e 2m/s respectivamente e dados simulados pelo modelo de redes neurais para velocidade do ar de 1,5m/s em camada fina



Fonte: Autor, 2015

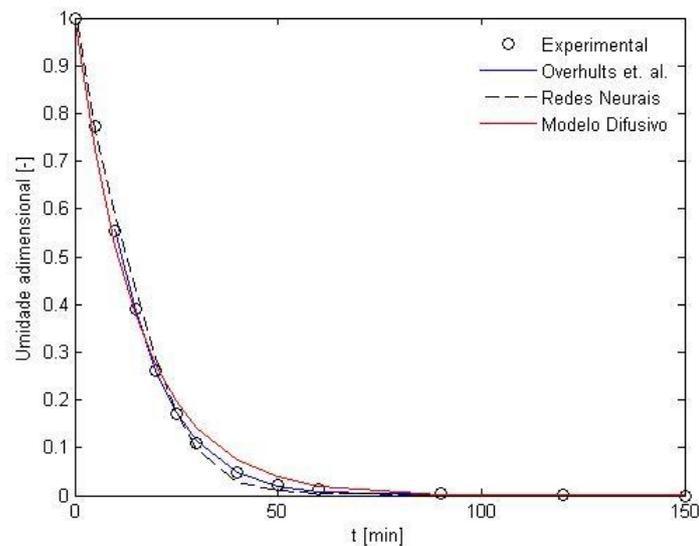
Figura 4.28: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente para velocidade do ar de secagem de 2m/s e temperatura de 80 e 100°C respectivamente e dados simulados pelo modelo de redes neurais para temperatura de 90°C em camada fina



Fonte: Autor, 2015

Para efeito de comparação entre os modelos testados para descrever a cinética de secagem em camada fina, sendo eles os modelos difusivo, semiempíricos e o das redes neurais serão apresentadas a seguir as duas condições experimentais extremas. A Figura 4.29 representa o ajuste feito para a condição experimental com temperatura de 60°C e velocidade de 1m/s.

Figura 4.29: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previsto pelos modelos de Overhults et al. (1973), redes neurais e modelo difusivo C.C.2(b) para secagem em camada fina para temperatura de 60°C e velocidade do ar de 1m/s



Fonte: Autor, 2015

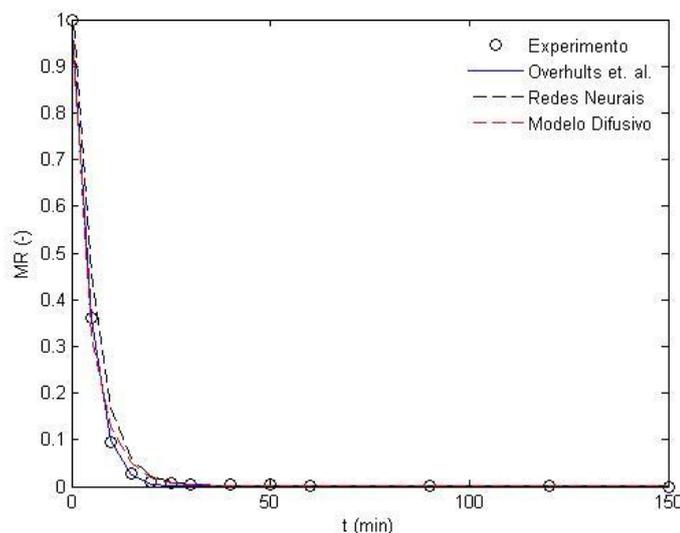
Ao fazer o ajuste para o modelo difusivo considerando as condições experimentais resultantes da Figura 4.29, foi utilizada a condição de contorno 2(b), representada pela equação (20), a qual considera a convecção mássica na superfície do meio poroso. Apesar do bom ajuste representado pelo modelo difusivo nota-se que, no início da secagem o modelo apresentou valores superestimados e após aproximadamente 25 minutos de secagem o modelo apresentou valores subestimados da cinética de secagem. Tal fato pode ser explicado pelo modelo considerar a difusividade efetiva como um parâmetro de valor constante.

Ao analisar os dados estatísticos contidos na Tabela 4.4, nota-se que os modelos semiempíricos que melhor se ajustaram aos dados experimentais foram os modelos de Page (1949) e de Overhults et al. (1973) que apresentaram os coeficientes de correlação mais próximos da unidade, a menor soma dos quadrados dos resíduos (SQR) e menor erro quadrático médio (EQM). Apesar de os modelos

de Page e Overhults apresentarem resultados idênticos, o modelo de Overhults et al. foi escolhido para representação gráfica. Observa-se ainda que o resultado apresentado pela técnica de redes neurais apresentou um ótimo ajuste aos dados experimentais visto que esta apresentou $r^2=0,9944$, $SQR=0,0904$ e $EQM=0,005$.

A Figura 4.30 apresenta a curva da cinética de secagem e mostra os valores dos dados experimentais e os valores previstos pelos modelos semiempíricos, modelo difusivo, e também pelo modelo obtido através da técnica de redes neurais para todo processo de secagem.

Figura 4.30: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previsto pelos modelos de Overhults et al. (1973), redes neurais e modelo difusivo C.C.2(a) para secagem em camada fina para temperatura de 120°C e velocidade do ar de 3m/s



Fonte: Autor, 2015

Ao analisar a Figura 4.30 é possível verificar que todos os modelos utilizados se ajustaram bem aos dados experimentais. O modelo difusivo foi ajustado utilizando a C.C.2(a).

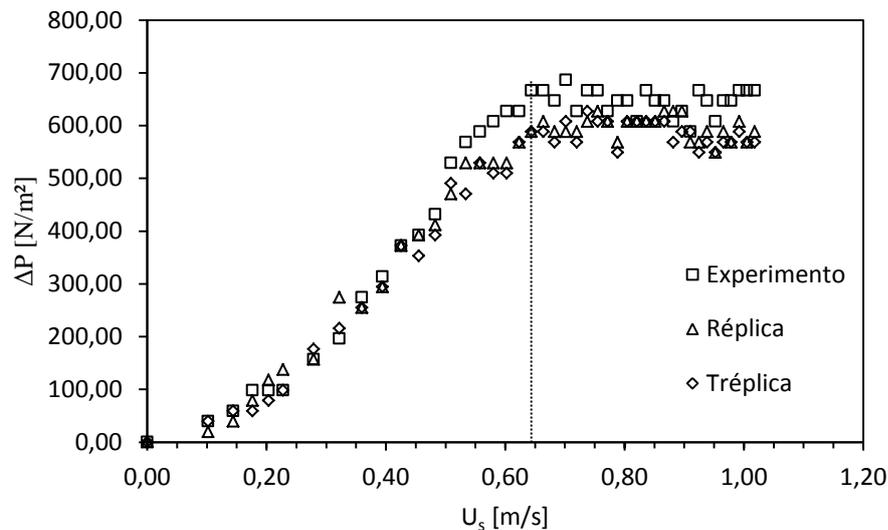
Os modelos semiempíricos utilizados foram ajustados aos dados experimentais e pode-se verificar pelos dados da Tabela 4.3 que os modelos que melhor se ajustaram foram os propostos por Page e também o de Overhults et al. Para a técnica de redes neurais ainda é possível observar que o modelo obtido pelas redes foi capaz de ajustar-se bem aos dados experimentais das condições utilizadas no trabalho.

4.3 Fluidodinâmica

Neste item serão apresentados os resultados da queda de pressão do leito em função da velocidade superficial do ar dos leitos fluidizado e vibrofluidizado, obtidos para partículas de alumina com diâmetro de 5,66mm. Nas curvas foram analisadas as diferenças de comportamento fluidodinâmico quando não é imposta a energia vibracional sob o sistema e também para imposição de vibração. Foi testado um mesmo adimensional de vibração obtido a partir de duas diferentes configurações, analisando então a influência da amplitude e frequência vibracional e consequentemente os efeitos da vibração.

Para avaliar a reprodutibilidade dos ensaios fluidodinâmicos a Figura 4.31 representa o resultado experimental, réplica e triplicata respectivamente, para condição de leito fluidizado (sem presença de vibração no sistema).

Figura 4.31: Curva fluidodinâmica para leito fluidizado



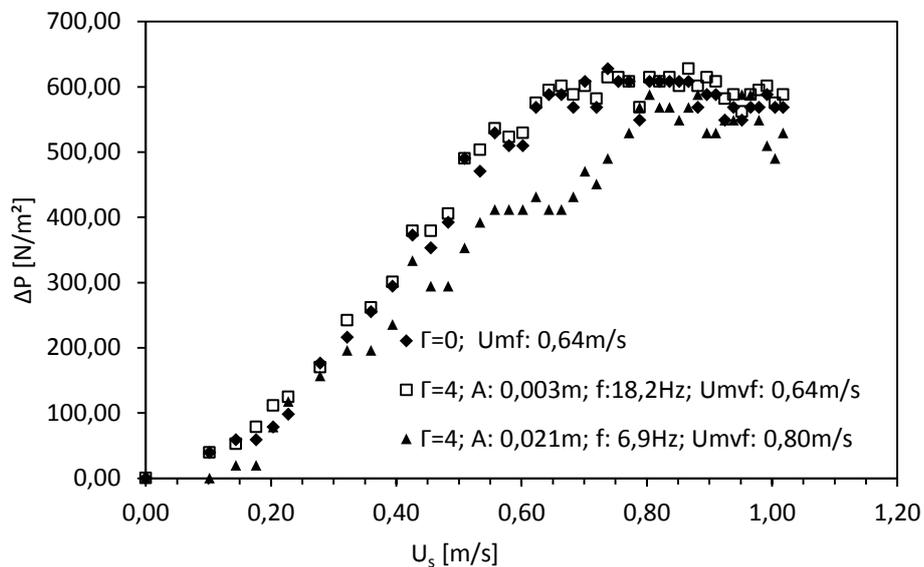
Fonte: Autor, 2015

A Figura 4.31 exibe curvas típicas para o leito fluidizado, onde é possível identificar uma região bem definida de transição de leito fixo para o leito fluidizado. A boa reprodutibilidade do método pode ser facilmente verificada face à visualização das curvas onde as mesmas estão praticamente sobrepostas umas as outras em praticamente toda extensão de U_s . Através da figura ainda é possível verificar que a mínima fluidização para a partícula utilizada foi de 0,64 m/s. Apesar de não ser

possível visualizar no resultado gráfico representado pela Figura 4.31, o leito apresenta formação de slugging já na velocidade de mínima fluidização, fato que comprova o que já tinha sido observado por Geldart (1973), de que as características das partículas utilizadas neste trabalho (grupo D) não apresentam boa fluidização. Visualmente verificava-se que, apesar do bom resultado da Figura 4.31 a fluidização era de má qualidade, o que já se esperava para partículas do grupo D.

A Figura 4.32 representa as curvas da queda de pressão do leito em função da velocidade superficial do ar quando foi imposta a vibração ao leito de partículas com energia vibracional $\Gamma=4$ e diferentes combinações de amplitude (A) e frequência (f). A curva de leito fluidizado será apresentada como referência. Por concisão, as réplicas dos resultados obtidos para estes experimentos não serão mostradas, visto que a reprodutibilidade do método também já foi confirmada anteriormente. Inicialmente será analisada a influência referente ao efeito de amplitude e frequência de vibração sobre o comportamento fluidodinâmico do leito de partículas.

Figura 4.32: Curva fluidodinâmica para leito vibrofluidizado



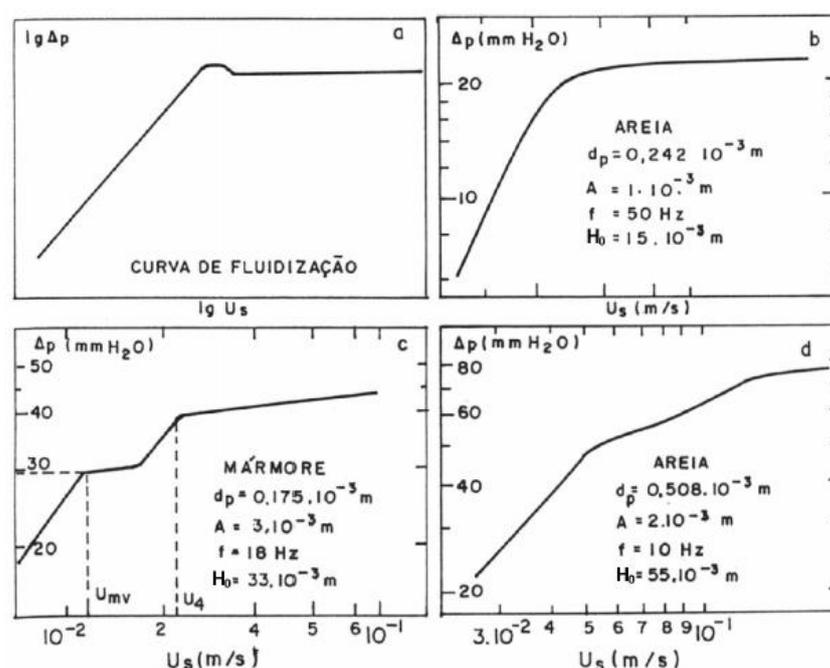
Fonte: Autor, 2015

Pode-se observar pelos resultados do leito vibrofluidizado, que para diferentes configurações vibracionais de um mesmo Γ , são alcançados diferentes comportamentos fluidodinâmicos. Nota-se que para altas amplitudes (A: 0,021m), em consequência baixa frequência, há uma redução na queda de pressão do leito

em comparação ao leito fluidizado, o que está de acordo com as observações feitas por Daleffe (2005), onde o autor verificou que para estas condições operacionais o leito de partículas tende a se expandir, facilitando o escoamento do ar, justificando valores menores para a queda de pressão do leito. Ao analisar a situação configurada por baixa amplitude ($A: 0,003\text{m}$) e alta frequência observa-se que houve um aumento na queda de pressão em relação à configuração oposta, possivelmente justificado pelo fato de um melhor arranjo das partículas e consequente maior dificuldade do escoamento do ar. Porém, a condição de alta amplitude e baixa frequência elevou a velocidade de mínima vibrofluidização de $0,64\text{m/s}$ para $0,80\text{m/s}$. Comparado ao leito fluidizado, este apresentou pequenas diferenças no comportamento fluidodinâmico, onde ambos apresentaram a mesma velocidade de mínima vibro fluidização sendo igual a $0,64\text{m/s}$, porém a vibração proporcionou uma pequena diminuição na queda de pressão no leito após a fluidização das partículas. Observa-se visualmente que a imposição da vibração sobre o sistema eliminou a formação de bolhas no leito.

A Figura 4.33 representa os tipos de curvas características encontradas por Strumillo e Pakowski, 1980 para leito fluidizado e vibrofluidizado em escalas logarítmicas.

Figura 4.33: Tipos de curvas características: (a) leito fluidizado; (b, c, d) leito vibrofluidizado; escalas logarítmicas



Fonte: Adaptado de Strumillo e Pakowski, 1980

Ao comparar as figuras Figura 4.32 e Figura 4.33, verifica-se que para um mesmo adimensional de vibração, utilizando o mesmo equipamento e material, foi possível obter curvas com características semelhantes às figuras Figura 4.33 (b) e (c), o qual foi obtido utilizando materiais diferentes.

4.4 Cinética de secagem leito vibrofluidizado

Antes de realizar a cinética de secagem em leito vibrofluidizado foi feito um teste de homogeneidade do leito, utilizando condições de temperatura do ar de 70°C e $\Gamma = 4$, obtido através das duas combinações de amplitude e frequência utilizadas neste trabalho e velocidade do ar de mínima vibrofluidização para cada configuração. Foram coletadas cinco amostras em diferentes posições axiais do leito de secagem para comprovar a homogeneidade. Os resultados obtidos para cada amostra estão dispostos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Teste de homogeneidade para o leito vibrofluidizado

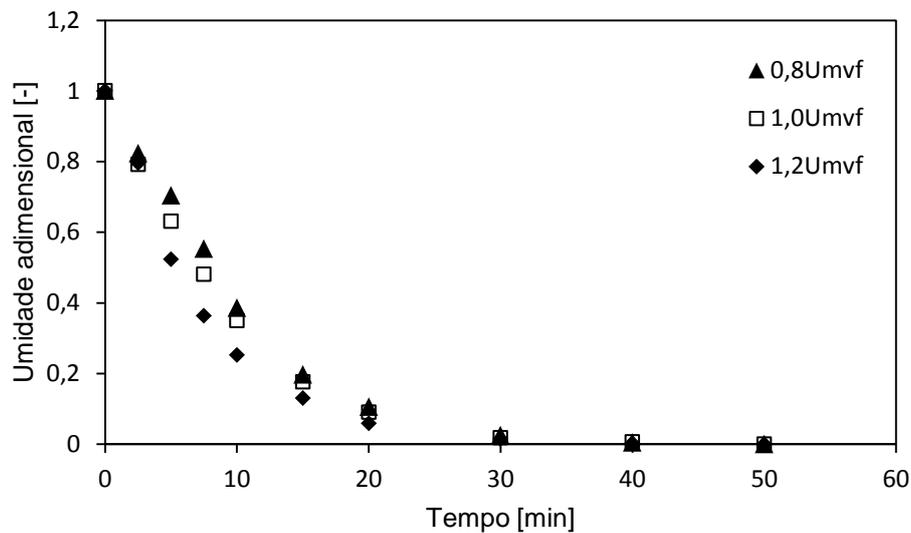
Amostra	A: 0,021m ; f:6,8Hz	A: 0,003m ; f:18,2 Hz
	X_{bs}	X_{bs}
1	0,130	0,157
2	0,127	0,165
3	0,127	0,169
4	0,134	0,170
5	0,136	0,171
Média	0,131	0,166
Desvio	0,003	0,004

Fonte: Autor, 2015

Comprova-se pelos dados da Tabela 4.5, que em ambos os casos, a homogeneidade da umidade das partículas no leito frente ao baixo desvio padrão da média dos valores de umidade em base seca do material em diferentes posições axiais do leito de secagem, garantindo que a retirada de apenas uma amostra durante a obtenção de dados de secagem do leito vibrofluidizado representa bem a umidade de todo o volume de partículas no leito.

A Figura 4.34 representa a cinética de secagem da alumina em função do tempo para temperatura e velocidade do ar de secagem de 70°C, 0,8, 1 e 1,2U_{mvf} respectivamente, para adimensional de vibração $\Gamma = 4$ com A: 0,003m e f: 18,2Hz.

Figura 4.34: Cinética de secagem em leito vibrofluidizado para temperatura de 70°C, $\Gamma = 4$; A: 0,003m e f: 18,2Hz

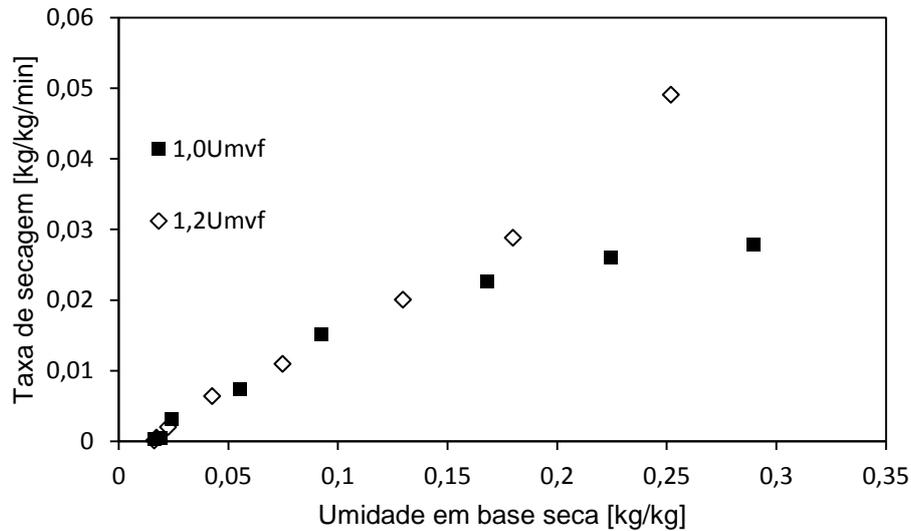


Fonte: Autor, 2015

É possível verificar que para as condições de vibração impostas durante os ensaios experimentais representados pela Figura 4.34 a velocidade do ar de secagem apresentou influência significativa na cinética de secagem principalmente nos 20 minutos iniciais. O resultado para a situação de $0,8U_{mvf}$ deve ser analisado com cuidado. Na Figura 4.34, aparentemente, pode-se comparar as condições para $0,8$, $1,0$ e $1,2U_{mvf}$, respectivamente, entretanto só para $1,0$ e $1,2U_{mvf}$ os pontos representam a umidade de todo o conjunto no leito. Já para $0,8U_{mvf}$ existe gradiente de umidade significativo no sistema, uma vez que este está na forma de leito fixo.

A Figura 4.35 representa a curva de Krischer ainda para as mesmas condições experimentais da Figura 4.34, sendo estas, temperatura e velocidade do ar de secagem de 70°C, 1 e $1,2U_{mvf}$ respectivamente e adimensional de vibração $\Gamma = 4$ com A: 0,003m e f: 18,2Hz.

Figura 4.35: Curva de Krischer para secagem em leito vibrofluidizado a temperatura de 70°C, $\Gamma = 4$; A: 0,003m e f:18,2Hz

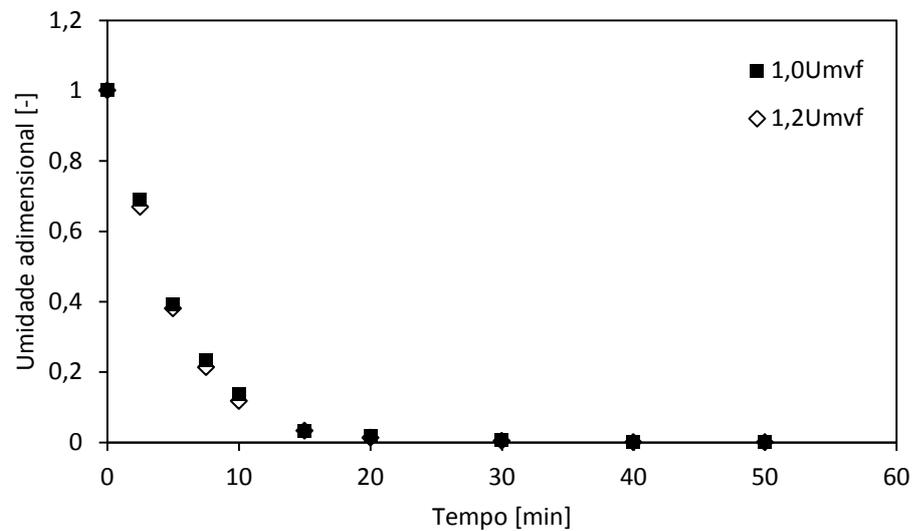


Fonte: Autor, 2015

Através dos dados apresentados, verifica-se mais uma vez a influência da velocidade do ar na cinética de secagem do material. Nota-se que para $1,0U_{mvf}$ há presença da taxa de secagem com período constante, devendo desta forma, ser levada em consideração os mecanismos convectivos de transferência de massa e somente a partir da umidade crítica ($X_{cr} \approx 0,21$) os mecanismos difusivos passam a controlar o processo de secagem. Para $1,2U_{mvf}$ a velocidade do ar de secagem utilizada no experimento fez com que toda a água superficial fosse evaporada rapidamente desde o início do processo, mostrando que a resistência externa a transferência de massa pode ser considerada desprezível durante todo o processo.

A Figura 4.36 representa a cinética de secagem da alumina em função do tempo para temperatura e velocidade do ar de secagem de 100°C, 1 e $1,2U_{mvf}$ respectivamente, para adimensional de vibração $\Gamma = 4$ com A: 0,021m e f: 6,8Hz.

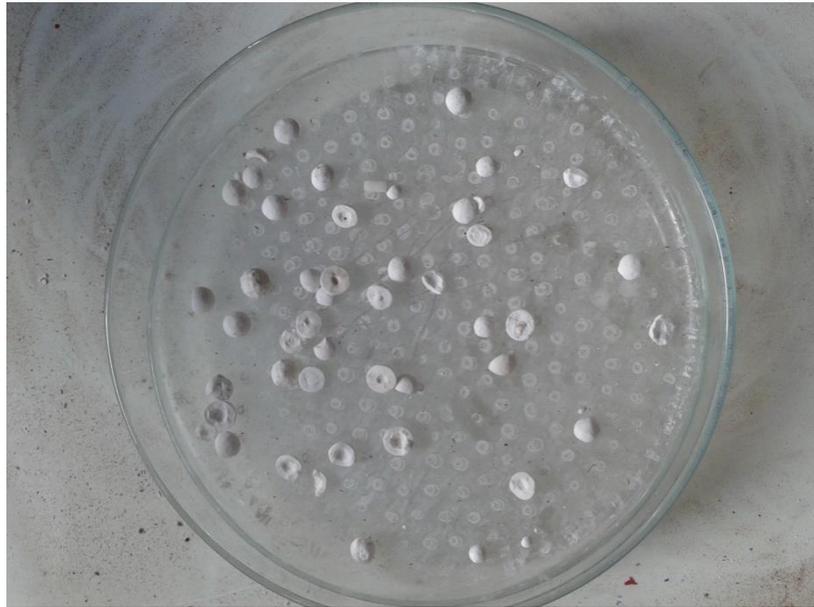
Figura 4.36: Cinética de secagem em leito vibrofluidizado para temperatura de 100°C, $\Gamma = 4$; A: 0,021m e f:6,8Hz



Fonte: Autor, 2015

Ao analisar as condições onde se utiliza alta amplitude e baixa frequência de vibração verifica-se que tanto para 1,0U_{mvf} quanto para 1,2U_{mvf}, as curvas estão praticamente sobrepostas, evidenciando que a velocidade do ar de secagem, no intervalo de 1,0 e 1,2U_{mvf}, respectivamente, deixou de ser significativa ao processo de transferência de massa. Desta forma, pode-se afirmar que o mecanismo preponderante para tais condições é a difusão. A alta amplitude de vibração por outro lado, proporcionou a ruptura do material conforme mostra a Figura 4.37, não sendo viável esta configuração de vibração do leito para esta partícula. Assim, o aumento de amplitude de 0,003 para 0,021 não é aconselhado para uso futuro desta partícula em leito vibrofluidizado.

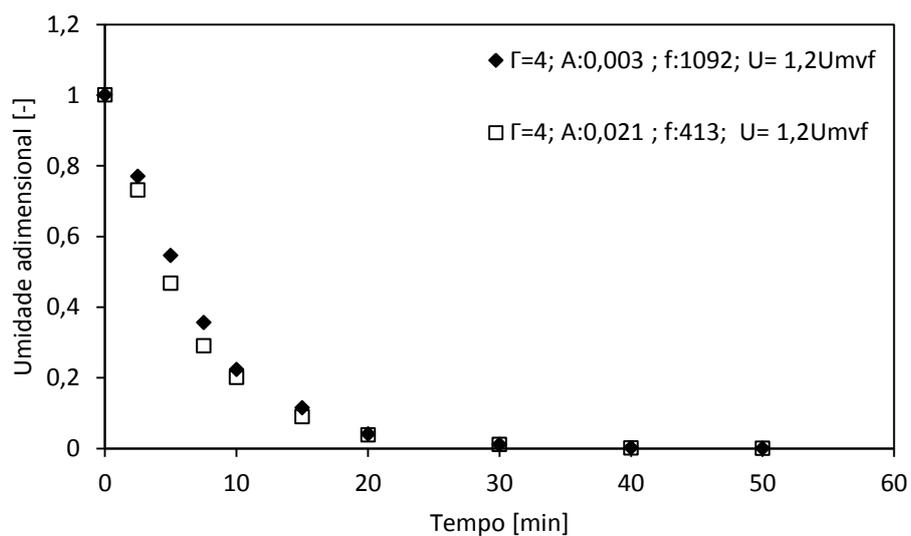
Figura 4.37: Partículas de alumina que foram secas utilizando A: 0,021m e f:6,8Hz



Fonte: Autor, 2015

A Figura 4.38 representa a cinética de secagem da alumina à temperatura de 80°C para $\Gamma = 4$, porém comparada a duas configurações diferentes: a primeira para A: 0,003m e f: 18,2Hz (baixa amplitude) e a segunda para A: 0,021m e f:6,8Hz (alta amplitude).

Figura 4.38: Cinética de secagem para leito vibro fluidizado a temperatura de 80°C e $\Gamma = 4$



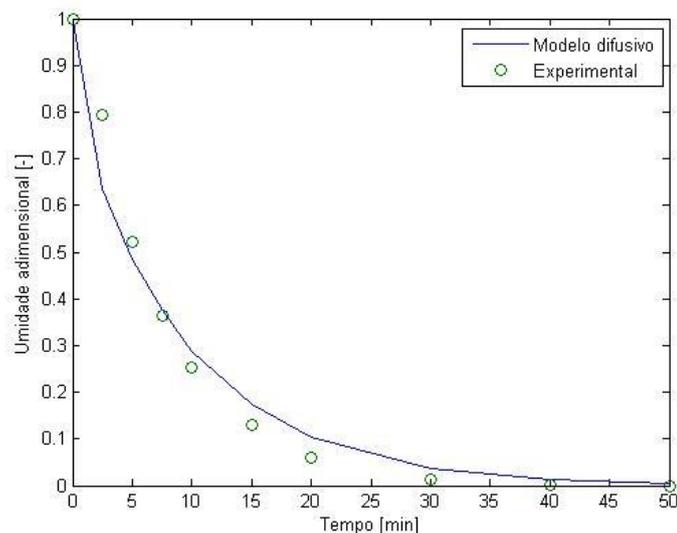
Fonte: Autor, 2015

Através dos resultados experimentais, verifica-se que apesar da significativa diferença no comportamento fluidodinâmico, para a cinética de secagem, estas duas situações são bem próximas. Para a amplitude de $A: 0,021\text{m}$ a cinética é ligeiramente mais rápida. Lembramos, entretanto, que para este estado de vibração muitas das partículas foram danificadas.

Considerando a mesma metodologia utilizada para camada fina, os dados experimentais foram usados para verificação do modelo difusivo, de equações semiempíricas e também foram utilizados para o treinamento de uma rede neural.

Inicialmente, por não apresentar período com taxa de secagem constante, conforme mostra Figura 4.35, será apresentada a verificação do modelo difusivo utilizando a C.C.2(a) para temperatura e velocidade do ar de 70°C e $1,2 U_{mvf}$ para configurações de vibração $\Gamma = 4$ com $A: 0,003\text{m}$ e $f: 18,2\text{Hz}$, a qual está representada pela Figura 4.39.

Figura 4.39: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente em leito vibrofluidizado para temperatura e velocidade do ar secagem de 70°C e U_{mvf} , respectivamente, $\Gamma = 4; A: 0,003\text{m}$ e $f: 18,2\text{Hz}$ e previstos pelo modelo difusivo utilizando C.C.2(a)

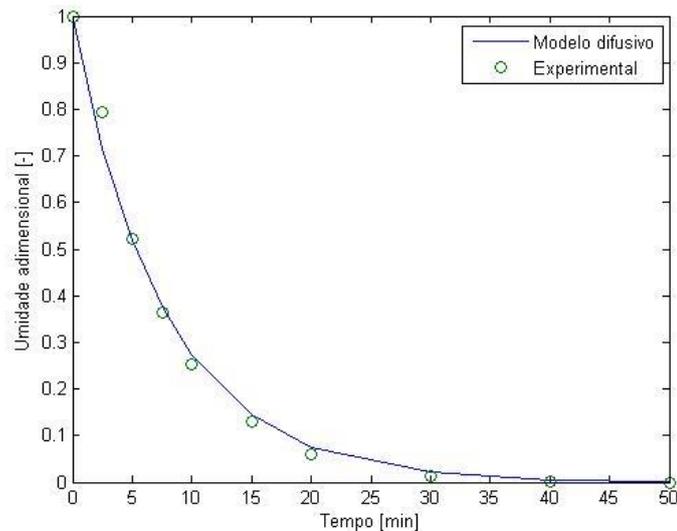


Fonte: Autor, 2015

Conforme pode ser verificado pela Figura 4.39 o modelo apresentado não apresentou bom ajuste aos dados experimentais, visto que, no início do processo os dados de cinética de secagem estão subestimados e após aproximadamente seis minutos do início, os dados passam a ficar superestimados pelo modelo. A C.C.2(a) assume que a superfície do material está em equilíbrio termodinâmico com o meio, porém ao analisar a figura 4.38 nota-se que a consideração feita ao modelo não

apresenta bom ajuste aos dados experimentais. Desta forma, foi feito um novo ajuste aos dados experimentais utilizando a C.C.2(b), o qual considera a convecção mássica no processo, ajuste este o qual está representado pela Figura 4.40.

Figura 4.40: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente em leito vibrofluidizado para temperatura e velocidade do ar secagem de 70°C e $1,0U_{mvf}$, respectivamente, $\Gamma= 4$; A: 0,003m e f:18,2Hz e previstos pelo modelo difusivo utilizando C.C.2(b)

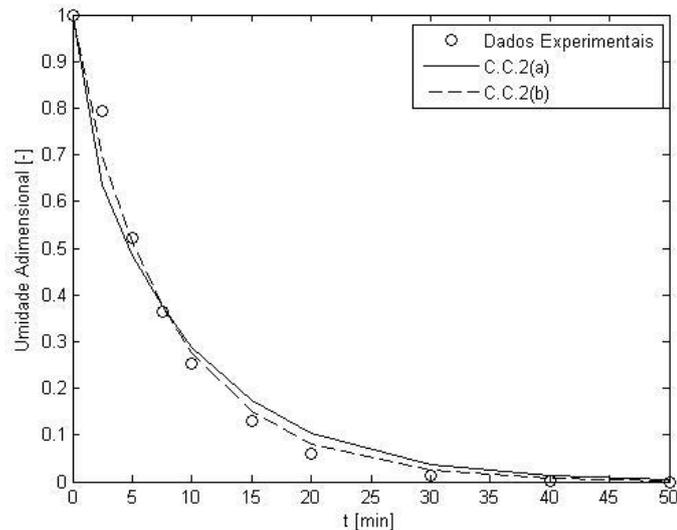


Fonte: Autor, 2015

Nota-se na Figura 4.40 que a condição de contorno utilizada para fazer o ajuste do modelo aos dados experimentais, apresentou bom resultado, visto que este apresentou $r^2 = 0,9897$, melhorando assim a representação da cinética de secagem quando se compara a Figura 4.39.

A Figura 4.41 representa a comparação entre os valores obtidos experimentalmente através da secagem em leito vibrofluidizado para temperatura e velocidade do ar de secagem de 70°C e $1,2U_{mvf}$ com $\Gamma= 4$ sendo A: 0,003m e f:18,2Hz e valores obtidos pelo modelo difusivo utilizando as C.C.2(a) e C.C.2.(b).

Figura 4.41: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente em leito vibrofluidizado para temperatura e velocidade do ar secagem de 70°C e $1,2U_{mvf}$, respectivamente, $\Gamma=4$; A: 0,003m e f:18,2Hz e previstos pelo modelo difusivo utilizando C.C.2(a) e C.C.2(b)

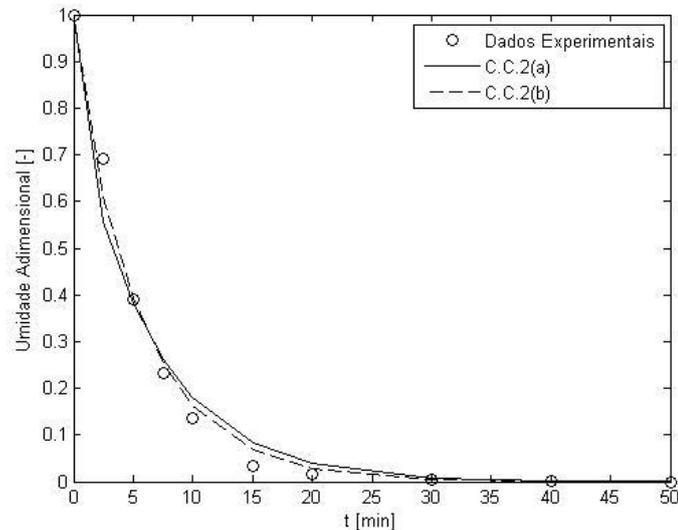


Fonte: Autor, 2015

Conforme pode ser verificado pela Figura 4.42 os dados previstos pelo modelo utilizando a C.C.2(b) representa melhor os dados experimentais, pois as hipóteses consideradas estão mais próximas à realidade, se comparada a C.C.2(a). É possível dizer que o pequeno desvio ainda apresentado pelo modelo pode estar relacionado ao fato do modelo considerar a difusão efetiva como uma propriedade constante ao longo do processo, conforme já verificado por Perazzini (2014), e também relacionado ao fato de que as hipóteses consideradas pelo modelo não são realidades neste caso, como transferência de massa unidirecional, difusividade efetiva de líquido constante e camada fina, porém ainda assim o modelo é capaz de representar bem o processo de secagem.

O mesmo procedimento de ajuste foi feito para temperatura e velocidade do ar de secagem de 100°C e $1,0U_{mvf}$, com $\Gamma=4$ e A: 0,021m e f: 6,8Hz. Conforme pode ser verificado pela Figura 4.42, os ajustes para configurações de um mesmo adimensional de vibração obtido através de diferentes combinações de amplitude e frequência apresentam resultados similares, portanto por concisão, os demais ajustes não serão apresentados.

Figura 4.42: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente em leito vibrofluidizado para temperatura e velocidade do ar secagem de 100°C e $1,0U_{mvf}$, respectivamente, $\Gamma=4$; A: 0,021m e f:6,8Hz e previstos pelo modelo difusivo utilizando C.C.2(b)



Fonte: Autor, 2015

Através do modelo difusivo também foi possível obter a difusividade efetiva para transferência de massa utilizando a equação (21). A solução foi obtida utilizando a ferramenta *nlinfit* do software MatLab. A partir dos dados apresentado na Tabela 4.6 nota-se que a temperatura do ar de secagem apresentou influência na D_{eff} , para ambos os casos de combinações de amplitude e frequência. Verifica-se ainda que a velocidade do ar apresentou influência significativa para condição de baixa amplitude, porém não para situação de alta amplitude de vibração. Analisando preliminarmente a influência dos parâmetros vibracionais, nota-se que a difusividade efetiva depende de diferentes combinações de amplitude e frequência, ainda que se mantenha Γ constante, o que indica a não universalidade do adimensional de vibração conforme já tinha sido observado por Perazzini (2013).

Tabela 4.6: Difusão efetiva prevista pelo modelo difusivo para secagem em leito vibrofluidizado

T[°C]	D_{eff} [m ² /s]			
	1,0 U_{mvf}		1,2 U_{mvf}	
	A: 0,003m	A: 0,021m	A: 0,003m	A: 0,021m
70	4,54E-04	5,57E-04	5,50E-04	5,63E-04
80	5,04E-04	6,32E-04	5,69E-04	6,54E-04
100	5,96E-04	7,89E-04	6,88E-04	8,53E-04

Fonte: Autor, 2015

Após a utilização do modelo difusivo, os dados foram também ajustados aos modelos semiempíricos apresentados no item 2.7.1, onde foi utilizado o método da soma dos mínimos quadrados para ajuste das curvas. Por apresentarem valor de r^2 mais próximos de 1 e menores SQR e EQM nota-se que as curvas que melhor se ajustaram aos pontos experimentais em todas as condições experimentais foram as originadas dos modelos de Page (1945) e Overhults et al (1975), conforme dados apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: : Resultados estatísticos para ajuste dos modelos empíricos aos dados experimentais para cinética de secagem em leito vibrofluidizado

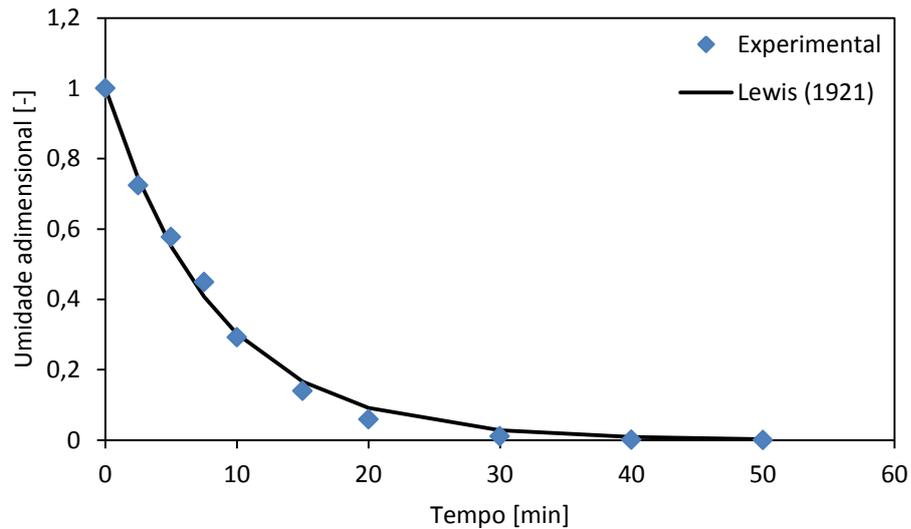
Temperatura [°C]	A [m]	Velocidade	Modelo	r^2	SQR	EQM
70	0,003	1,0U _{mvf}	Lewis	0,9968	0,0052	5,23E-04
			Brooker et al.	0,9964	0,0047	4,71E-04
			Henderson & Henderson	0,9964	0,0047	4,71E-04
			Page	0,9986	0,0016	1,61E-04
		Overhults et al.	0,9986	0,0016	1,61E-04	
		1,2U _{mvf}	Lewis	0,9957	0,0063	6,30E-04
			Brooker et al.	0,9957	0,0050	5,01E-04
			Henderson & Henderson	0,9957	0,0050	5,01E-04
	Page		0,9981	0,0022	2,23E-04	
	Overhults et al.	0,9981	0,0022	2,23E-04		
	0,021	1,0U _{mvf}	Lewis	0,9979	0,0030	2,97E-04
			Brooker et al.	0,9979	0,0024	2,38E-04
			Henderson & Henderson	0,9979	0,0024	2,38E-04
			Page	0,9991	0,0011	1,08E-04
		Overhults et al.	0,9991	0,0011	1,08E-04	
		1,2U _{mvf}	Lewis	0,9971	0,0040	3,97E-04
Brooker et al.			0,9971	0,0033	3,25E-04	
Henderson & Henderson			0,9971	0,0033	3,25E-04	
Page	0,9984		0,0018	1,83E-04		
Overhults et al.	0,9984	0,0018	1,83E-04			
80	0,003	1,0U _{mvf}	Lewis	0,9962	0,0049	4,94E-04
			Brooker et al.	0,9960	0,0049	4,88E-04
			Henderson & Henderson	0,9960	0,0049	4,88E-04
			Page	0,9968	0,0036	3,64E-04
			Overhults et al.	0,9968	0,0036	3,64E-04

		Lewis	0,9956	0,0069	6,89E-04
		Brooker et al.	0,9954	0,0056	5,58E-04
	1,2U _{mfv}	Henderson & Henderson	0,9954	0,0056	5,58E-04
		Page	0,9993	0,0008	7,89E-05
		Overhults et al.	0,9993	0,0008	7,89E-05
		Lewis	0,9997	0,0005	4,54E-05
		Brooker et al.	0,9997	0,0004	3,86E-05
	1,0U _{mfv}	Henderson & Henderson	0,9997	0,0004	3,86E-05
		Page	1,0000	0,0000	3,71E-06
		Overhults et al.	1,0000	0,0000	3,71E-06
0,021		Lewis	0,9973	0,0035	3,55E-04
		Brooker et al.	0,9973	0,0030	2,98E-04
	1,2U _{mfv}	Henderson & Henderson	0,9973	0,0030	2,98E-04
		Page	0,9990	0,0011	1,12E-04
		Overhults et al.	0,9990	0,0011	1,12E-04
		Lewis	0,9956	0,0071	7,09E-04
		Brooker et al.	0,9953	0,0060	5,99E-04
	1,0U _{mfv}	Henderson & Henderson	0,9953	0,0060	5,99E-04
		Page	0,9993	0,0008	7,89E-05
		Overhults et al.	0,9993	0,0008	7,89E-05
0,003		Lewis	0,9921	0,0119	1,19E-03
		Brooker et al.	0,9919	0,0099	9,93E-04
	1,2U _{mfv}	Henderson & Henderson	0,9919	0,0099	9,93E-04
		Page	0,9993	0,0008	8,37E-05
		Overhults et al.	0,9993	0,0008	8,37E-05
100		Lewis	0,9959	0,0054	5,43E-04
		Brooker et al.	0,9958	0,0047	4,73E-04
	1,0U _{mfv}	Henderson & Henderson	0,9958	0,0047	4,73E-04
		Page	0,9994	0,0007	6,52E-05
		Overhults et al.	0,9994	0,0007	6,52E-05
0,021		Lewis	0,9973	0,0035	3,49E-04
		Brooker et al.	0,9972	0,0031	3,09E-04
	1,2U _{mfv}	Henderson & Henderson	0,9972	0,0031	3,09E-04
		Page	0,9999	0,0002	2,05E-05
		Overhults et al.	0,9999	0,0002	2,05E-05

Fonte: Autor, 2015

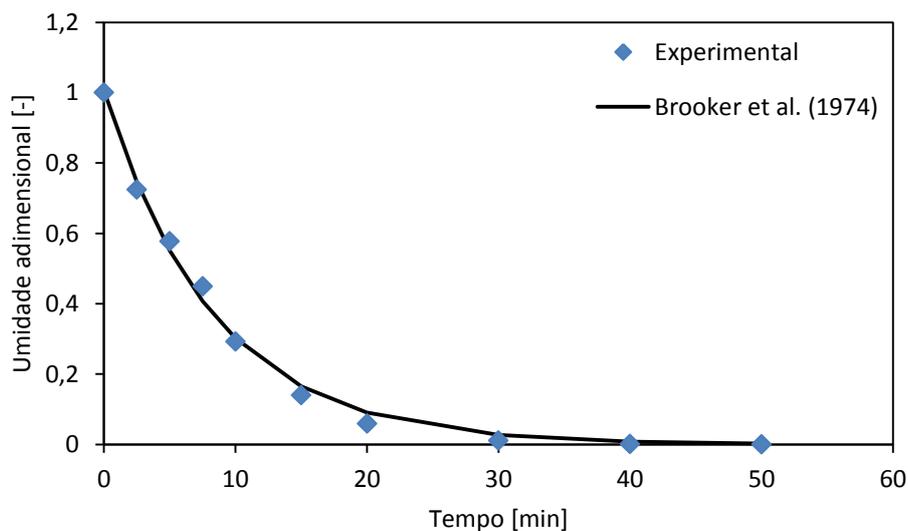
Por concisão, será apresentada da Figura 4.43 a Figura 4.47, a comparação feita entre os valores obtidos experimentalmente para temperatura e velocidade do ar de secagem de 80°C e $1,0U_{mvf}$, respectivamente, para A: 0,003m e f: 18,2Hz.

Figura 4.43: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Lewis (1921) – leito vibrofluidizado a temperatura e velocidade do ar de secagem de 80°C e $1,0U_{mvf}$, respectivamente e $\Gamma=4$; A: 0,003m e f:18,2Hz



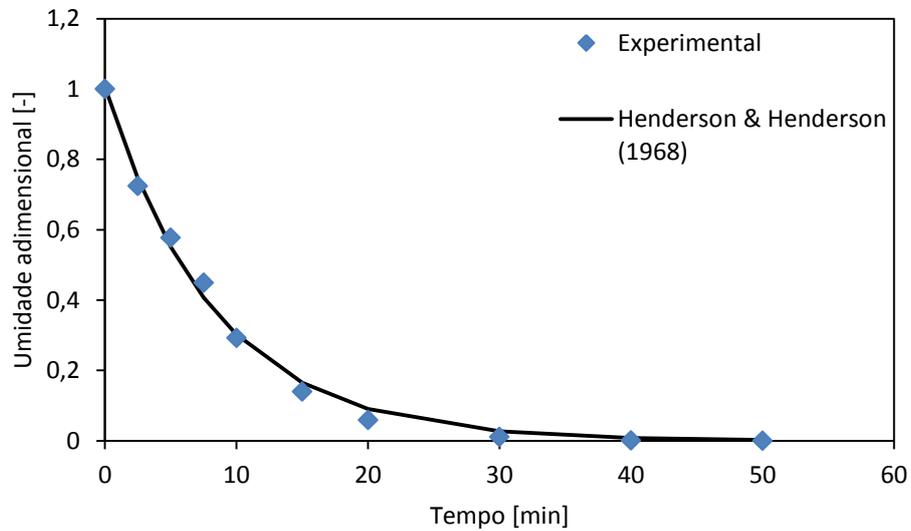
Fonte: Autor, 2015

Figura 4.44: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Brooker et al. (1974) – leito vibrofluidizado a temperatura e velocidade do ar de secagem de 80°C e $1,0U_{mvf}$, respectivamente e $\Gamma=4$; A: 0,003m e f:18,2Hz



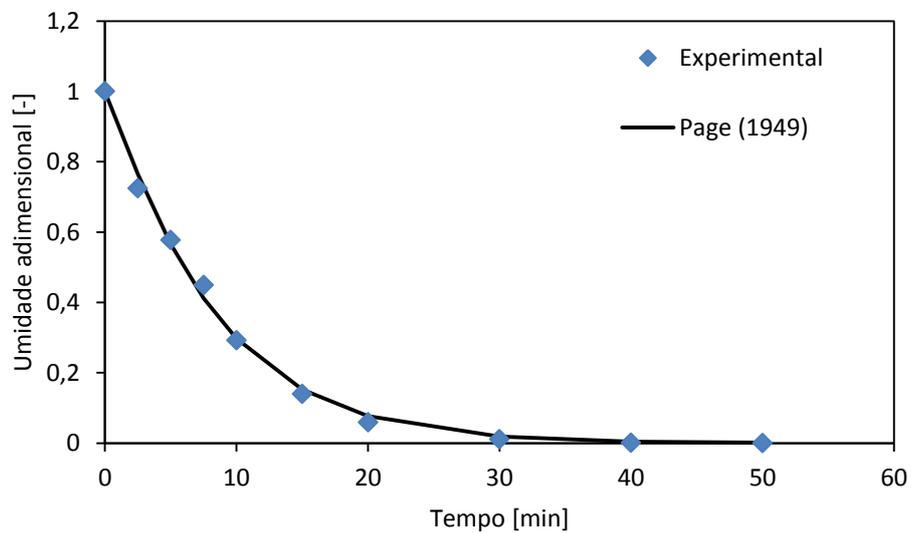
Fonte: Autor, 2015

Figura 4.45: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Henderson & Henderson (1968) – leito vibrofluidizado a temperatura e velocidade do ar de secagem de 80°C e $1,0U_{mf}$, respectivamente e $\Gamma = 4$; A: 0,003m e f:18,2Hz



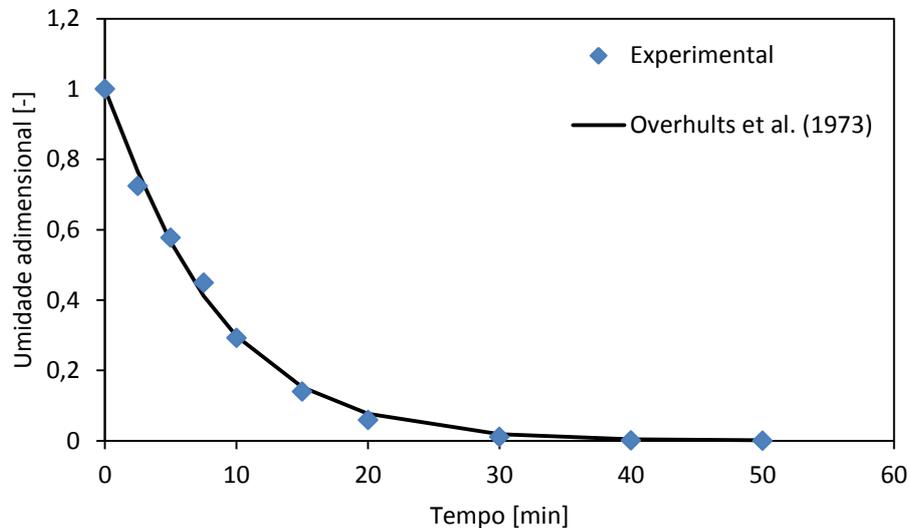
Fonte: Autor, 2015

Figura 4.46: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Page (1949) – leito vibrofluidizado a temperatura e velocidade do ar de secagem de 80°C e $1,0U_{mf}$, respectivamente e $\Gamma = 4$; A: 0,003m e f:18,2Hz



Fonte: Autor, 2015

Figura 4.47: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de Page (1949) – leito vibrofluidizado a temperatura e velocidade do ar de secagem de 80°C e $1,0U_{mvf}$, respectivamente e $\Gamma= 4$; A: 0,003m e f:18,2Hz

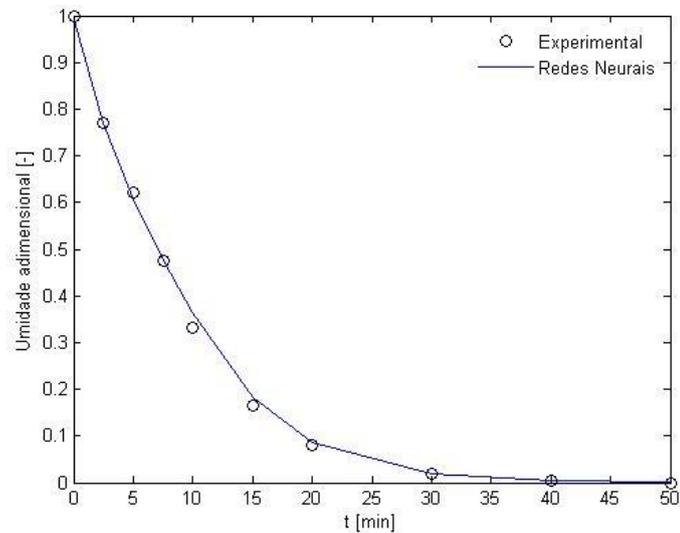


Fonte: Autor, 2015

Além da utilização do modelo difusivo e dos modelos empíricos, também foi utilizada a ferramenta de ajuste de redes neurais, a qual foi criada utilizando o comando *nftool* do software *MathworksMatlab*, da mesma maneira utilizada para secagem em camada fina. Para cinética de secagem em leito vibrofluidizado foi criada uma única rede neural para todo o conjunto de dados experimentais com uma camada de entrada de cinco neurônios onde as variáveis fornecidas foram o tempo de processo, temperatura e velocidade do ar de secagem, amplitude e frequência de vibração. A rede possui também uma camada intermediária com cinco neurônios e uma camada de saída com um neurônio cuja variável fornecida é a umidade. O treinamento da rede foi feito com cem épocas utilizando 60% das informações do banco de dados experimental e a verificação e o teste da rede foram feitos utilizando 20% dos dados cada um respectivamente.

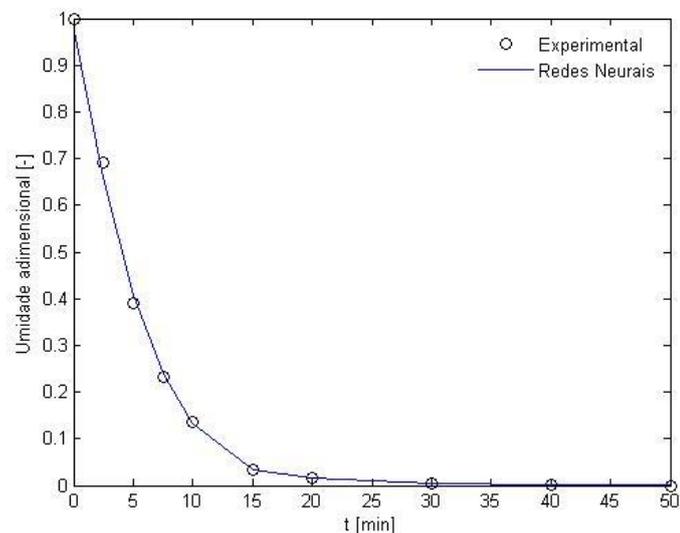
As figuras Figura 4.48 e Figura 4.49 representam os dados experimentais e o ajuste proposto pelo modelo das redes neurais para temperatura e velocidade do ar de secagem de 70°C e $1,0U_{mvf}$, para $\Gamma= 4$ e A: 0,003m e f: 18,2Hz e 100°C e $1,0U_{mvf}$, para $\Gamma= 4$ e A:0,021m e f: 6,8Hz respectivamente.

Figura 4.48: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de redes neurais – para secagem em leito vibrofluidizado a temperatura e velocidade de 70°C e $1,0U_{\text{mvf}}$
 $\Gamma = 4$ e $A:0,003\text{m}$ e $f: 18,2\text{Hz}$



Fonte: Autor, 2015

Figura 4.49: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previstos pelo modelo de redes neurais – para secagem em leito vibrofluidizado a temperatura e velocidade de 100°C e $1,0U_{\text{mvf}}$
 $\Gamma = 4$ e $A:0,021\text{m}$ e $f: 6,8\text{Hz}$



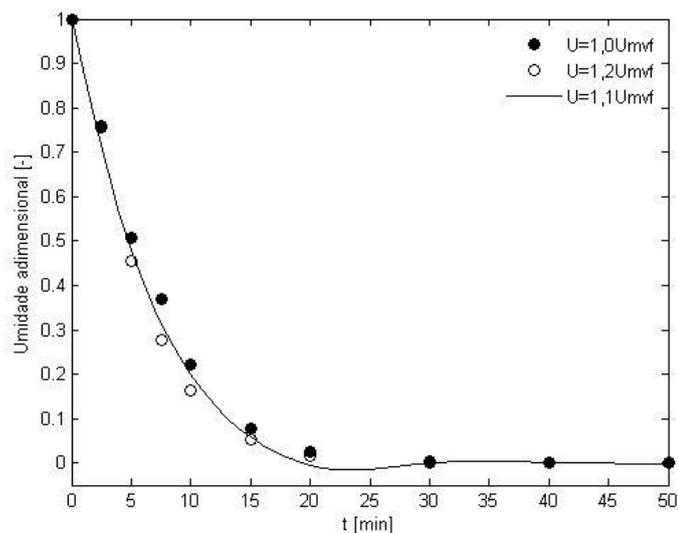
Fonte: Autor, 2015

Como é possível visualizar através das figuras Figura 4.48 e Figura 4.49, o uso da técnica de redes neurais mostrou-se muito eficiente, visto que uma única rede foi capaz de reproduzir bem os dados de cinética de secagem em função do tempo

para ambas as condições experimentais apresentadas, sendo elas de temperaturas e combinações de amplitude e frequência distintas.

Além do bom ajuste aos dados experimentais, as redes neurais mostraram-se eficientes também para simular resultados experimentais dentro da faixa de operação na qual os experimentos foram realizados. A Figura 4.50 representa os dados experimentais da cinética de secagem em função do tempo para temperatura do ar de secagem de 70°C, velocidade de 1,0U_{mvf} e 1,2U_{mvf} e também a simulação feita para 1,1U_{mvf} para $\Gamma=4$ e A: 0,003m e f: 18,2Hz. Esses dados foram obtidos fora dos valores usados para treinamento e verificação da rede, porém no intervalo de valores usados neste trabalho.

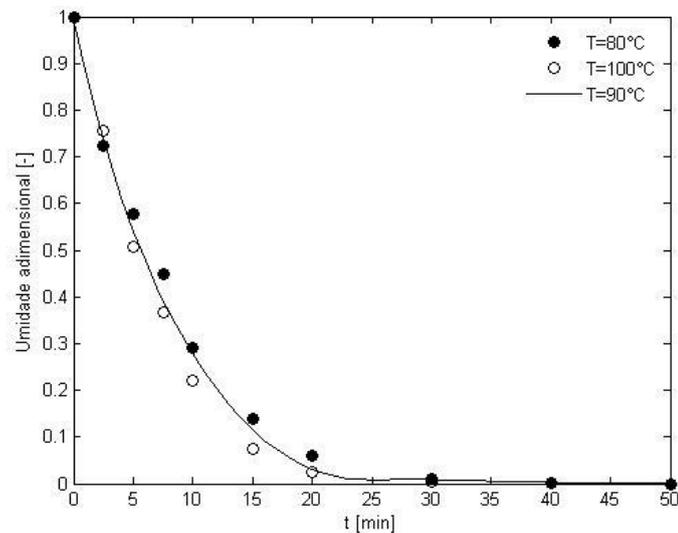
Figura 4.50: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente para velocidade do ar de secagem de 1,0U_{mvf} e 1,2U_{mvf} respectivamente e temperatura de 70°C e dados simulados pelo modelo de redes neurais para 1,1U_{mvf} em leito vibrofluidizado



Fonte: Autor, 2015

A Figura 4.51 representa os dados experimentais da cinética de secagem em função do tempo para velocidade do ar de secagem igual a 1,0U_{mvf}, temperatura de 80 e 100°C respectivamente e também a simulação feita para temperatura de 90°C para $\Gamma=4$ e A: 0,003m e f: 18,2Hz.

Figura 4.51: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente para temperatura do ar de secagem de 80 e 100°C respectivamente e velocidade de $1,0U_{mvf}$ e dados simulados pelo modelo de redes neurais para 90°C em leito vibrofluidizado

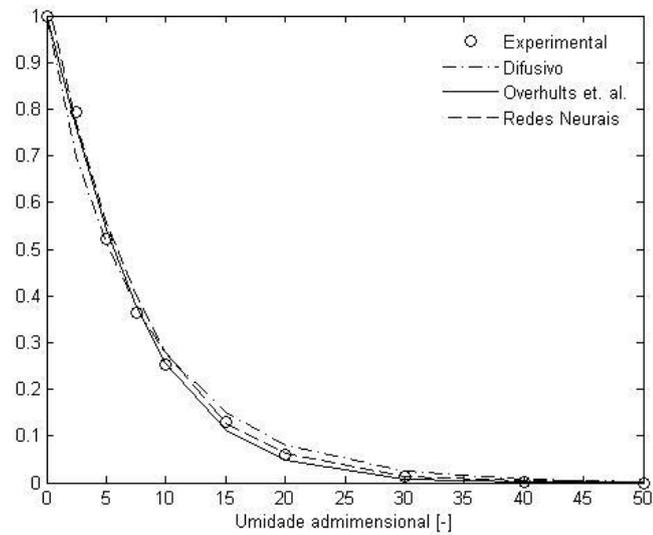


Fonte: Autor, 2015

Como se pode notar através das figuras Figura 4.50 e Figura 4.51, a rede neural também foi capaz de simular os dados de cinética de secagem em função do tempo para temperatura e velocidade do ar de secagem na situação apresentada.

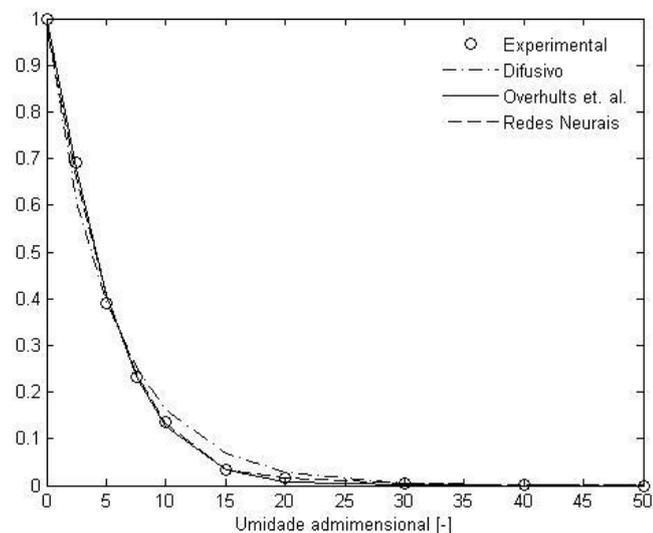
Como forma de comparação entre os modelos testados para descrever a cinética de secagem em leito vibrofluidizado, estão apresentadas nas figuras Figura 4.52 e Figura 4.53 as cinéticas de secagem em função do tempo obtidas através dos dados experimentais, modelo difusivo, semiempíricos e das redes neurais. A Figura 4.52 mostra os dados para temperatura e velocidade do ar de secagem de 70°C e $1,2U_{mvf}$, com $\Gamma = 4$ e $A: 0,003m$ e $f: 18,2Hz$ e a Figura 4.53 para 100°C, $1,0U_{mvf}$, com $\Gamma = 4$ e $A: 0,021m$ e $f: 6,8Hz$.

Figura 4.52: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previsto pelos modelos difusivo C.C.2(b), Overhults et al. (1973) e redes neurais para secagem em leito vibrofluidizado para temperatura de 70°C e $1,2U_{mvf}$ com $\Gamma=4$ e $A:0,003m$ e $f: 18,2Hz$



Fonte: Autor, 2015

Figura 4.53: Comparação entre os valores obtidos experimentalmente e previsto pelos modelos difusivo C.C.2(b), Overhults et al. (1973) e redes neurais para secagem em leito vibrofluidizado para temperatura de 70°C e $1,0U_{mvf}$ com $\Gamma=4$ e $A:0,021m$ e $f: 6,8Hz$



Fonte: Autor, 2015

Ao analisar as figuras Figura 4.52 e Figura 4.53 é possível verificar que todos os modelos utilizados se ajustaram bem aos dados experimentais. O modelo difusivo foi ajustado utilizando a C.C.2(b). Os modelos semiempíricos utilizados foram ajustados aos dados experimentais e pode-se verificar pelos dados da Tabela 4.7

que os modelos que melhor se ajustaram foram os propostos por Page e também o de Overhults et al. Para a técnica de redes neurais ainda é possível observar que o modelo obtido pela rede foi capaz de ajustar-se bem aos dados experimentais para combinações distintas de amplitude e frequência, como já apresentado.

5 CONCLUSÕES

Neste item serão apresentadas as conclusões referentes aos resultados obtidos neste trabalho.

- As cinéticas de secagem em função do tempo foram realizadas para diferentes temperaturas para todos os equipamentos e verificou-se que a temperatura exerce influência sobre a cinética, embora não seja tão significativa quanto à influência observada na secagem de grãos, por exemplo.
- Verificou-se que para a secagem em camada fina o efeito convectivo foi significativo até a velocidade do ar de secagem atingir 2m/s, após o qual, sua influência decai, o que indica que os efeitos difusivos passem a ser dominantes.
- Foram observados também diferentes comportamentos na fluidodinâmica e na cinética de secagem do leito vibrofluidizado para um mesmo adimensional de vibração obtido através de duas diferentes combinações de amplitude e frequência.
- Para condições de baixa amplitude e alta frequência notou-se que a velocidade do ar apresentou influência sobre a cinética de secagem do material, porém ao utilizar condições de alta amplitude e baixa frequência a velocidade do ar deixou de apresentar influência sobre a cinética de secagem.
- Observou-se que a utilização de alta amplitude de vibração proporcionou ruptura do material, não sendo esta viável para a secagem do material em aplicações futuras.
- A condição de operação que apresentou uma cinética de secagem mais rápida foi a secagem em leito vibrofluidizado com utilização de alta temperatura, $1,2U_{mvf}$ e condição de baixa amplitude e alta frequência de vibração.
- Para os experimentos realizados o modelo difusivo apresentou bom ajuste aos dados experimentais.
- Os modelos empíricos que melhor se ajustaram aos dados experimentais para todas as condições de secagem de secagem foram os modelos de Page (1949) e o modelo de Overhults et al. (1973).
- Verificou-se que quanto maior o número de variáveis na camada de entrada, maior o número de neurônios na camada intermediária para um bom ajuste do modelo obtido pela rede neural.
- Conclui-se também que uma única rede neural conseguiu ajustar e simular satisfatoriamente os dados experimentais e em comparação com o modelo difusivo

e com os modelos semiempíricos, esta se mostrou mais vantajosa, visto que a rede representa bem uma faixa operacional e não um único experimento como os outros modelos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

- Analisar até que amplitude, entre 0,003 e 0,021m respectivamente, não irá proporcionar a ruptura do material;
- Verificar se é possível utilizar a técnica de secagem de uma partícula, similar ao que se faz na camada fina, para os estudos de secagem em leitos vibrofluidizados. Em sendo possível, analisar a influência dos parâmetros vibracionais no processo.
- Realizar modificações mecânicas no leito a fim de possibilitar a realização de estudos de secagem com alimentação contínua de partículas
- Realizar estudos de secagem de diferentes materiais particulados em leitos vibrofluidizado (sementes de café, milho, etc.).
- Investigar o motivo da diferença encontrada na ordem de grandeza da difusividade efetiva encontrada no modelo difusivo neste trabalho e no trabalho de Perazzini (2014).

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRIECHE, L. da S. Evolução da forma e encolhimento de um sistema gel durante a secagem por convecção forçada. 2003. 136f. Dissertação (Mestrado em pesquisa e desenvolvimento de processos químicos) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.

BARROZO, M. A. S., Transferência de calor e massa entre o ar e semente de soja em leito deslizante e escoamentos cruzados. 1995, p. 163. (Tese de Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, SP, 1995.

BAUGHMAN, D.R., LIU, Y. A., 1995. Neural Networks in Bio-Processing and Chemical Engineering. Academic Press. New York.

BIRD, R. B, STEWART, W. E., LIGHTFOOT, E. N. Fenômenos de transporte. 2Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 838p.

BRATU, E.; JINESCU, G.I. (1971). Effect of vertical vibration on the pressure drop in a fluidized layer. British Chemical Engineering, v.16, n.8, p.691-695.

BREVE, F.A. Classificação de Imagens Tomográficas de ciência de solos utilizando Redes Neurais e Combinações de Classificadores.2006. 57f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Centro de Ciência Exata e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

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

BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F. W., HALL, C. W., Drying and storage of grains and oilseeds. New York. AVI Book, 1992. 450p.

CARDOSO, C. S. B.; KIECKBUSCH, T. G. (1999). *Secagem de Fatias de Banana em Leito Vibrofluidizado a Altas Temperaturas por Curto Tempo*. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, XXVI., Teresópolis, RJ, 1998. Anais do XXVI ENEMP, Teresópolis, RJ, Editora da UFRRJ, v.2, p. 385-392.

CHEN, X. D. Moisture diffusivity in food and biological materials. Drying Technology, v.25, p.1203-1213, 2007.

CHLENOV, V.A.; MIKHAILOV, N. V. (1965). In: PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S.; STRUMILLO, C.. Theory and Application of Vibrated Beds and Vibrated Fluid Beds for Drying Process, In: Advances in Drying, Hemisphere Publishing Corporation, New York, v. 1, p. 211-226, 1984.

CHLENOV, V.A.; MIKHAILOV, N. V..Vibrokipyashchi Sloi (1972). In: STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z..Drying of Granular Products in Vibrofluidized Beds.In: Drying'80, Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.211-226, 1980.

- CORRÊA, L. J. Estudo da secagem de semente de embaúba em leito fluidizado. 2012. 72p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2012.
- COSTA, S.S; MORIS, V.A.S; ROCHA, S.C.S. Influence of Process Variables on Granulation of Microcrystalline cellulose in vibrofluidized bed. *Powder Technology*, Vol. 207, p. 454-460, 2011.
- CRANK, J. *The mathematics of diffusion*. 2. Ed. Oxford: Clarendon Press, 1975. 414p.
- CREMASCO, M. A. *Fundamentos de transferência de massa*. 2. Ed. Campinas: Editora Unicamp, 2008. 725 p.
- DALEFFE, R. V. (2005). *Contribuições para a Análise do Comportamento Fluidodinâmico de um Leito Vibrofluidizado*. São Carlos, SP, UFSCar (Tese).
- DALEFFE, R. V.; FREIRE, J. T. (2004). *Analysis of the Fluid-dynamic Behavior of Fluidized and Vibrofluidized Bed Containing Glycerol*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, São Paulo, v.21, n.1, p.35-46. Disponível on-line no site: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-66322004000100005&lng=en&nrm=iso>
- ECCLES, E. R. A.; MUJUMDAR, A. S. (1997). *Bubble Phenomena in Aerated Vibrated Beds of Small Particles*. *Drying Technology*, New York, v.15, n.1, p.95-116.
- ERDÉSZ, K. (1990). *Hydrodynamic Studies on Vibrated Fluidized Beds*. *Power Handling & Processing*, Germany, v.2, n.4, p.327-339.
- ERDÉSZ, K.; ORMÓS, Z. (1984), *Bed expansion and pressure drop in Vibrofluidized layers*, *Drying Technology*, Vol. 12, p.169-177, 1984.
- FERREIRA, A.L.O. *Síntese Enzimática de Ampicilina em Reator Integrado*. 2004. 190f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.
- FOUST, A. S. et al. *Princípios das Operações Unitárias*. 2. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982, 670p.
- GELDART, D. (1973). *Types of Gas Fluidization*. *Powder Technology*, v. 7, p. 285 – 292.
- GUPTA, R.; MUJUMDAR, A. S. (1980) *Aerodynamic and thermal characteristics of vibrated fluidized beds: a review*. In: *Drying '80*, Hemisphere Pub., New York, v.1, p.141-150.
- HENDERSON, J. M, HENDERSON, S. M. *A computational procedure for deep bed drying analysis*, *J. Agric. Eng. Res.*, Vol. 13, p.87-95, 1968.

KEEY, R. B. Introduction to industrial drying operations. Oxford: Pergamom Press, 1978. 376p.

KEEY, R. B. Drying of loose and particle materials. Hemisphere Publishing Corporation: New York, 1992 cap. 2: Particle Properties, p. 11-27.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solids material. In: The Symposium on Drying. The Journal of I. & E. Ch. Vol. 13 (5), p. 427-432, 1921.

MEILI., L., Contribuições ao Estudo da Fluidodinâmica e da Secagem de Pastas em Leitos Fluidizado e Vibrofluidizado. 2009. 218p. (Tese de Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, SP, 2009.

MENON, A. S., MUJUMDAR, A. S., Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers. In: Mujumdar, A. S. Handbook of Industrial Drying. New York: Marcel Dekker Inc., Cap. 9, 295-326, 1987.

MOVAGHARNEJAD, K; NIKZAD,M. Modeling of tomato drying using artificial neural network. Computers and Eletronics in Agriculture, v. 59, p. 78-85. 2007.

OVERHULTZ, D. G., WHITE, G. M., HAMILTON, H. E., ROSS, I. J., Drying of soybeans with heated air, Transactions of ASAE, Vol. 16, p. 112-113, 1973.

OLIVEIRA JR., A.B, Estudo da Transferência de Calor e Massa no Processo de Secagem em Leito Vibrofluidizado. 2003. 202p. (Dissertação Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, SP, 2003.

PAGE, C., Factors influencing the maximum rate of drying shelled corn in layers, M. S. Thesis, Purdue University, 1949.

PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S.; STRUMILLO, C. (1984). Theory and Application of Vibrated Beds and Vibrated Fluid Beds for Drying Process. In: Advances in Drying, Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p.211-226.

PARK, K. J., VOHNIKOZA, Z.; BROD, F. P. R. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispata* L.) Journal of Food Engineering. Davis, v.51, n.3, p.193-199, 2002.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A., Conceitos de Processo e Equipamentos de Secagem, 2007.

PATTERSON, D. W. (1996). Artificial Neural Networks: Theory and Applications, Prentice-Hall. Singapore.

PERAZZINI, H., FREIRE, F.B., FREIRE, J. T., Difusão de umidade na secagem de partículas porosas em leito vibro-fluidizado. Anais do XXXVI Congresso Brasileiro de Materiais Particulados. Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2013.

PERAZZINI, H., Secagem de sólidos granulares. 2014. 170p. (Tese de Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, SP, 2014.

PRADO, M. M. Secagem de sementes de mamão papaya. 2000. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) -Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2000.

RUTHVEN, D. M. Principles of adsorption and adsorption processes. USA: John Wiley& Sons Inc., 1984. 433 p.

STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z. (1980). Drying of Granular Products in Vibrofluidized Beds. In: Drying '80, Hemisphere Publishing Corporation, New York, v.1, p. 211-226.

TOPUZ, A. Predicting moisture content of agricultural products using artificial neural networks. Advances in Engineering Software. v 41, p. 464-470. 2009