

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

**“ANÁLISE DA SECAGEM CONVECTIVA DE FOLHAS DE MANJERICÃO
(*Ocimum basilicum* L.)”**

Renata de Aquino Brito Lima

SÃO CARLOS – SP

2013

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

**“ANÁLISE DA SECAGEM CONVECTIVA DE FOLHAS DE MANJERICÃO
(*Ocimum basilicum* L.)”**

Renata de Aquino Brito Lima

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutora em Engenharia Química.

Orientadora: Maria do Carmo Ferreira

Co-orientador: José Teixeira Freire

SÃO CARLOS – SP

2013

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

L732as

Lima, Renata de Aquino Brito.

Análise da secagem convectiva de folhas de manjeriço (*Ocimum basilicum* L.) / Renata de Aquino Brito Lima. -- São Carlos : UFSCar, 2013.

145 f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2013.

1. Secagem. 2. Meios porosos. 3. Permeabilidade. 4. Encolhimento. 5. Leito fixo. 6. Leito vibro-fluidizado. I. Título.

CDD: 660.28426 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **RENATA DE AQUINO BRITO LIMA**, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS EM 19 DE MARÇO DE 2013.

BANCA EXAMINADORA:



Maria do Carmo Ferreira
Orientadora / UFSCar



Luis Alexandre Pedro de Freitas
USP



Ione Andriani Costa
UFVJM



Dermeval J. Mazzini Sartori
UFSCar



Fábio Bentes Freire
UFSCar

À minha família,
por tudo que representam em minha vida.

“Entrega o teu caminho ao SENHOR,
confia nele, e o mais ele fará.”

(Salmos 37:5)

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por me guiar ao longo desta caminhada e pela oportunidade de mais uma conquista.

Aos meus pais Nilson de Brito Lima e Sônia Lima de Aquino pelo amor, incentivo e confiança durante toda a minha vida.

Aos meus irmãos Marcelo, Marcela, Vinícius e Fernanda, e sobrinhos Daniel, Rafaela e Felipe pelo carinho e amizade incondicional.

Ao meu marido Luciano por estar sempre presente, pela dedicação, pelo apoio e por todo o amor, que foram muito importantes para a concretização deste trabalho.

À minha orientadora, professora Maria do Carmo Ferreira, pela orientação dedicada, pelos ensinamentos, disponibilidade e constante incentivo.

Ao meu co-orientador, professor José Teixeira Freire, por suas valiosas contribuições durante a realização deste trabalho.

Aos professores Luis Alexandre Pedro de Freitas, Ione Andriani Costa, Dermeval José Mazzini Sartori e Fábio Bentes Freire que, como membros da banca de defesa, contribuíram com importantes sugestões.

Aos técnicos Oscar da Silva, Edilson Milaré, e Adilson Mota pelo apoio prestado.

Aos amigos Bruna, Priscila, Liliane, Ediane, Aruana, Eduardo, Isabel, Ariany, Maisa, Hugo, Gustavo, Érika, Viviane, Jaqueline, Isabela, Keylla e Thiago por compartilharem os prazeres e dificuldades desta jornada.

À CAPES pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xvi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Plantas aromáticas, medicinais e/ou condimentares.....	3
2.1.1 A espécie <i>Ocimum basilicum</i>	5
2.2 Secagem.....	7
2.2.1 Importância da secagem de plantas aromáticas, medicinais e/ou condimentares	7
2.2.2 Generalidades sobre secagem.....	9
2.2.3 Secagem convectiva em leitos fixos.....	10
2.2.4 Secagem em leitos fixos de plantas aromáticas, medicinais e/ou condimentares	12
2.2.5 Secagem de plantas em leitos móveis	19
2.2.5.1 Comportamento fluidodinâmico de leitos fluidizados e vibrofluidizados ..	22
2.2.5.2 Secagem em leitos fluidizados e vibrofluidizados	24
2.3 Umidade de equilíbrio	26
2.4 Propriedades físicas dos materiais.....	32
2.4.1 Dimensões Características.....	33
2.4.2 Forma.....	34
2.4.3 Massa específica.....	37
2.4.4 Porosidade	39
2.4.5 Condutividade térmica efetiva.....	40
2.4.6 Calor específico	41

2.5	Empacotamento e caracterização de meios porosos.....	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1	Material e caracterização.....	46
3.1.1	Propriedades físico-químicas.....	46
3.1.2	Densidades <i>bulk</i> aerada e consolidada.....	51
3.1.3	Umidade de equilíbrio.....	52
3.2	Equipamentos.....	55
3.2.1	Unidade experimental 1.....	55
3.2.1.1	Ensaio preliminares.....	56
3.2.1.2	Secagem em leito fixo e camada delgada.....	57
3.2.1.3	Secagem em leito fixo e camada espessa.....	58
3.2.1.4	Secagem com encolhimento ‘controlado’.....	60
3.2.2	Unidade experimental 2.....	61
3.2.2.1	Ensaio preliminares.....	62
3.2.3	Unidade experimental 3.....	63
3.3	Procedimento experimental.....	64
3.3.1	Empacotamento do material e condições experimentais de secagem.....	64
3.3.2	Cinética de secagem em leito fixo e camada fina.....	66
3.3.3	Secagem em leito fixo e camada espessa.....	66
3.3.3.1	Determinação da distribuição de temperatura no leito.....	66
3.3.3.2	Determinação da distribuição de umidade no leito.....	67
3.3.3.3	Encolhimento ‘controlado’.....	67
3.3.4	Secagem em leitos ‘fluidizado’ e vibro-aerado.....	68
3.3.4.1	Curvas de ΔP em função de U	68
3.3.4.2	Verificação da homogeneidade da secagem.....	68
4	RESULTADOS.....	70
4.1	Considerações preliminares.....	70
4.2	Caracterização do material.....	74

4.2.1	Propriedades físico-químicas.....	74
4.2.2	Propriedades térmicas.....	76
4.2.2.1	Conductividade térmica	77
4.2.2.2	Calor específico.....	78
4.2.3	Umidade de equilíbrio	79
4.3	Ensaio preliminares.....	83
4.3.1	Verificação da uniformidade do escoamento do ar	84
(a)	Unidade experimental 1	84
(b)	Unidade experimental 2	85
4.3.2	Calibração dos termopares.....	85
4.4	Cinética de secagem de folhas em leito fixo e camada delgada.....	86
4.4.1	Estudo de caso	86
4.4.2	Análise da literatura.....	92
4.5	Análise da secagem sob diferentes formas de contato	93
4.5.1	Secagem em leitos espessos	93
4.5.1.1	Distribuição de temperatura no leito	94
4.5.1.2	Distribuição de umidade no leito	97
4.5.2	Secagem em leito ‘fluidizado’	99
4.5.2.1	Comportamento fluidodinâmico	99
4.5.2.2	Secagem	102
4.5.3	Secagem em leito ‘vibro-aerado’	104
4.5.3.1	Comportamento fluidodinâmico	104
4.5.3.2	Secagem	107
4.5.4	Secagem em leito fixo com escoamento de ar paralelo ao leito de folhas	108
4.6	Análise da secagem de folhas associada à razão D/d_m	110
4.6.1	Densidade <i>bulk</i>	110
4.6.2	Secagem em camada fina	114

4.6.3	Secagem em leitos espessos	117
4.6.3.1	Distribuição de temperatura no leito	117
4.6.3.2	Distribuição de umidade no leito	119
4.7	Secagem com encolhimento ‘controlado’	121
5	CONCLUSÕES	126
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	129
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
	APÊNDICE	141

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – <i>Ocimum basilicum</i>	6
Figura 2.2 – Distribuição dos (a) métodos de secagem e (b) tipos de produtos alimentícios usados em estudos sobre secagem de alimentos nos últimos 10 anos.....	11
Figura 2.3 – Ilustração esquemática do processo de secagem em camada fina com as duas superfícies sendo secas.	13
Figura 2.4 – Isoterma de sorção típica mostrando o fenômeno de histerese.....	27
Figura 2.5 – Definições de circularidade e esfericidade utilizadas para a descrição da forma de grãos e pedregulhos.	35
Figura 3.1 – Fotografias das folhas cortadas em (a) duas e (b) quatro partes.	46
Figura 3.2 – Esquema do aparato experimental utilizado na determinação da condutividade térmica efetiva.	50
Figura 3.3 – Fotografias do dispositivo de madeira utilizado para a compactação padronizada das folhas.	52
Figura 3.4 – Esquema geral do dispositivo utilizado na obtenção das isotermas de equilíbrio.	54
Figura 3.5 – Linha de fornecimento de ar utilizada na secagem em leito fixo com escoamento de ar cruzado à amostra.	55
Figura 3.6 – Esquema da distribuição dos pontos de amostragem no leito cilíndrico.	57
Figura 3.7 – Célula utilizada nos ensaios de secagem em camada fina.	58
Figura 3.8 – Célula usada na obtenção da distribuição de temperatura no leito.	59
Figura 3.9 – Célula usada na obtenção da distribuição de umidade no leito.....	59
Figura 3.10 – Célula usada nas medidas de encolhimento ‘controlado’.	60
Figura 3.11 – Linha de fornecimento de ar utilizada na secagem em leito fluidizado.....	61
Figura 3.12 – Esquema da distribuição dos pontos de amostragem no leito retangular.....	63
Figura 3.13 – Linha de fornecimento de ar utilizada na secagem com escoamento de ar paralelo à amostra.	64
Figura 3.14 – Esquema da distribuição dos pontos de amostragem para verificação da homogeneidade da secagem das folhas no leito.	69
Figura 4.1 – Esquema representativo de um empacotamento (a) ordenado e (b) aleatório de discos.	71

Figura 4.2 – Densidade <i>bulk</i> em função do número de batidas para folhas de manjeriço inteiras.	72
Figura 4.3 – Fotografias da célula durante a secagem das folhas de manjeriço; T=60°C; tempo de secagem: (a) 0 minutos; (b) 60 minutos; (c) 150 minutos e (d) 200 minutos.....	73
Figura 4.4 – Cromatograma do óleo essencial das folhas de manjeriço <i>in-natura</i>	75
Figura 4.5 – Fração mássica das folhas de manjeriço em função do diâmetro da peneira: (a) distribuição granulométrica e (b) distribuição granulométrica acumulada.	77
Figura 4.6 – Curvas obtidas na determinação da condutividade térmica efetiva das folhas de manjeriço secas e pulverizadas pelo método da sonda linear.	78
Figura 4.7 – Calor específico das folhas de manjeriço secas e pulverizadas pelo método da calorimetria de varredura diferencial.....	79
Figura 4.8 – Comparação dos valores das isotermas de dessorção para as folhas de manjeriço nas temperaturas de 30, 45 e 60°C, com as estimativas obtidas pelos modelos de Halsey modificado e Sigma-Copace.....	81
Figura 4.9 – Distribuição dos resíduos em função dos valores de conteúdo de umidade de equilíbrio estimados pelos modelos de (a) Halsey modificado e (b) Sigma-Copace para folhas de manjeriço para T=30, 45 e 60°C.	83
Figura 4.10 – Adimensional de velocidade do ar em função de R_d/R_c	84
Figura 4.11 – Superfície de resposta do adimensional de velocidade do ar em função do comprimento de largura do leito.....	85
Figura 4.12 – Relação entre os valores de temperatura medidos pelo termopar de número 10 e o calibrador de temperaturas.	86
Figura 4.13 – Adimensional de umidade em função do tempo para as folhas de manjeriço inteiras; $U=0,40\text{m.s}^{-1}$: (a) T=30°C; (b) 45°C e (c) 60°C.	87
Figura 4.14 – Fotografias da célula obtidas durante a secagem em camada fina para as folhas inteiras de manjeriço; T=30°C; tempo de secagem: (a) 0 e (b) 540 minutos.	88
Figura 4.15 – Adimensional de umidade em função do tempo para T=30°C; $U=0,40\text{m.s}^{-1}$ e folhas inteiras, e estimativas obtidas pelo modelo de Midilli e Kucuk: (a) Ensaio; (b) Réplica 1 e (c) Réplica 2.....	89
Figura 4.16 – Adimensional de umidade médio em função do tempo parametrizado na temperatura do ar de secagem; folhas de manjeriço inteiras; $U=0,40\text{m.s}^{-1}$	90
Figura 4.17 – Curvas de taxa de secagem em função do adimensional de umidade obtidas na secagem das folhas de manjeriço inteiras; $U=0,4\text{m.s}^{-1}$	91

Figura 4.18 – Temperatura do leito de folhas de manjeriço em função do tempo de secagem parametrizado na altura da célula; Folhas inteiras; $U=0,40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) $T=30^\circ\text{C}$ e $R_h=30,3\%$; (b) $T=60^\circ\text{C}$ e $R_h=1,8\%$	94
Figura 4.19 – Fotografias da célula de medida durante a secagem em camada espessa de folhas inteiras de manjeriço; $T=60^\circ\text{C}$; $U=0,4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) 0 minutos e (b) 360 minutos de secagem.	95
Figura 4.20 – Fotografias dos leitos de folhas inteiras após 200 minutos de secagem; $T=60^\circ\text{C}$: (a) aglomerado de folhas e (b) interior do aglomerado de folhas.....	96
Figura 4.21 – Temperatura do leito de sementes de girassol ($m\cong 340,0\text{g}$) em função do tempo de secagem parametrizado na altura da célula de medida; $T=70^\circ\text{C}$; $U=0,40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; $R_h=1,7\%$..	97
Figura 4.22 – Umidade média do leito de folhas de manjeriço em função do tempo de secagem parametrizado na altura da célula; Folhas inteiras; $U=0,40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) $T=30^\circ\text{C}$; (b) $T=60^\circ\text{C}$	98
Figura 4.23 – Fotografias da célula de medida durante a secagem em camada espessa de folhas inteiras de manjeriço; $T=60^\circ\text{C}$; $U=0,4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) 0 minutos e (b) 240 minutos de secagem.	99
Figura 4.24 – ΔP em função de U ; Folhas de manjeriço inteiras: (a) $H_0=5,0\text{cm}$; $\rho_b=0,094\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; (b) $H_0=10,0\text{cm}$; $\rho_b=0,086\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ e (c) $H_0=20,0\text{cm}$; $\rho_b=0,086\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	100
Figura 4.25 – Fotografias do leito ‘fluidizado’ operando com folhas inteiras de manjeriço: (a) $H_0=5,0\text{cm}$; $U=0,73\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $H_0=10,0\text{cm}$; $U=0,80\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (visão de topo) e (c) $H_0=20,0\text{cm}$; $U=1,12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	102
Figura 4.26 – Fotografias do leito de folhas de manjeriço durante o processo de secagem em tempos de secagem iguais a (a) 0 horas; (b) 3 horas e (c) 8 horas.	104
Figura 4.27 – Leito ‘vibro-aerado’; Queda de pressão no leito em função de U ; Folhas inteiras de manjeriço: (a) $H_0=5,0\text{cm}$; $A=4,0\times 10^{-3}\text{m}$; $\Gamma=0,5$; (b) $H_0=10,0\text{cm}$; $A=5,0\times 10^{-3}\text{m}$; $\Gamma=0,5$; (c) $H_0=10,0\text{cm}$; $A=5,0\times 10^{-3}\text{m}$; $\Gamma=1,0$ e (d) $H_0=20,0\text{cm}$; $A=4,0\times 10^{-3}\text{m}$; $\Gamma=0,5$	105
Figura 4.28 – Leito ‘vibro-aerado’; Queda de pressão no leito em função de U parametrizado em Γ ; Folhas inteiras de manjeriço: (a) $H_0=5,0\text{cm}$; (b) $H_0=10,0\text{cm}$ e (c) $H_0=20,0\text{cm}$	106
Figura 4.29 – Gráficos de dispersão com os valores de umidade obtidos nos diferentes pontos de amostragem em função do comprimento e largura do leito; $t=8$ horas de secagem: (a) $\Gamma=0,0$ e (b) $\Gamma=1,0$; $A=5,0\times 10^{-3}\text{m}$	108
Figura 4.30 – Fotografia do leito de folhas de manjeriço a final da secagem ($t=8$ horas) utilizando vibração desde $t=0$ hora.	108

Figura 4.31 – Adimensional de umidade em função do tempo para a secagem de folhas inteiras de manjerição em leito fixo com escoamento de ar paralelo; $T=60^{\circ}\text{C}$; $U=1,0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$..	109
Figura 4.32 – Adimensional de umidade em função do tempo para a secagem de folhas inteiras com escoamento cruzado e paralelo ao leito; $T=60^{\circ}\text{C}$	109
Figura 4.33 – Gráficos de densidade <i>bulk</i> compactada em função do número de batidas para folhas de manjerição <i>in-natura</i> : (a) inteiras e (b) em 4 partes.....	110
Figura 4.34 – Densidade <i>bulk</i> média como uma função do n° de batidas para folhas de manjerição <i>in-natura</i> de diferentes tamanhos.	112
Figura 4.35 – Densidade <i>bulk</i> média em função do n° de batidas para folhas de manjerição com diferentes teores de umidade: (a) folhas inteiras; (b) cortadas em 2 partes e (c) cortadas em 4 partes.....	113
Figura 4.36 – Adimensional de umidade em função do tempo para as folhas de manjerição cortadas em duas partes ($D/d_m=5,3$); $U=0,40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) $T=30^{\circ}\text{C}$; (b) 45°C e (c) 60°C	115
Figura 4.37 – Adimensional de umidade em função do tempo para as folhas de manjerição cortadas em quatro partes ($D/d_m=7,8$); $U=0,40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) $T=30^{\circ}\text{C}$; (b) 45°C e (c) 60°C	116
Figura 4.38 – Taxas de secagem em função do adimensional de umidade obtidas na secagem das folhas de manjerição em diferentes tamanhos; $U=0,40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) $T=30^{\circ}\text{C}$ e (b) $T=60^{\circ}\text{C}$.	117
Figura 4.39 – Temperatura do leito de folhas de manjerição em função do tempo de secagem parametrizado na altura da célula; Folhas cortadas em 4 partes; $U=0,40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) $T=30^{\circ}\text{C}$ e $R_h=30,3\%$; (b) $T=60^{\circ}\text{C}$ e $R_h=1,8\%$	118
Figura 4.40 – Fotografias da célula de medida durante a secagem em camada espessa de folhas de manjerição cortadas em 4 partes; $T=60^{\circ}\text{C}$; $U=0,4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) 0 minutos e (b) 150 minutos de secagem.....	119
Figura 4.41 – Umidade média do leito de folhas de manjerição em função do tempo de secagem parametrizado na altura da célula; Folhas cortadas em 4 partes; $U=0,40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) $T=30^{\circ}\text{C}$; (b) $T=60^{\circ}\text{C}$	120
Figura 4.42 – Fotografias da célula de medida durante a secagem em camada espessa de folhas de manjerição cortadas em 4 partes; $T=60^{\circ}\text{C}$; $U=0,4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) 0 minutos e (b) 240 minutos de secagem.....	121
Figura 4.43 – Leito fixo e camada espessa de folhas inteiras de manjerição; $U=0,40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; $\Delta P/L$ em função do tempo de secagem para (a) $T=30^{\circ}\text{C}$; (b) $T=60^{\circ}\text{C}$	122
Figura 4.44 – Permeabilidade do leito em função do tempo via equação de Darcy.	123

Figura 4.45 – Leito fixo e camada espessa de folhas inteiras de manjeriço; $U=0,40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; Variação da altura do leito em função do tempo de secagem para: (a) $T=30^\circ\text{C}$; (b) $T=60^\circ\text{C}$.

..... 124

Figura 4.46 – Fotografias da célula obtidas durante a secagem em camada espessa das folhas inteiras de manjeriço; $T=60^\circ\text{C}$; tempo de secagem (a) 0 e (b) 180 minutos; (c) Interior do leito (visão de topo). 124

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Correlações de secagem em camada fina.	15
Tabela 2.2 – Equações de isotermas de equilíbrio.....	30
Tabela 3.1 – Valores de umidade relativa relacionados às soluções salinas saturadas nas temperaturas de 30, 45 e 60°C.....	53
Tabela 3.2 – Condições experimentais utilizadas nos experimentos de secagem.	65
Tabela 4.1 – Propriedades físico-químicas das folhas de manjeriço.	74
Tabela 4.2 – Composição química do óleo essencial das folhas de manjeriço <i>in-natura</i>	76
Tabela 4.3 – Valores de condutividade térmica efetiva obtidos para as folhas de manjeriço secas e em pó utilizando o método da sonda linear.....	78
Tabela 4.4 – Valores de umidade de equilíbrio e respectivos desvios padrão obtidos para as folhas de manjeriço durante a dessorção de umidade em função de T e R_h	80
Tabela 4.5 – Parâmetros dos modelos ajustados para calcular M_e das folhas de manjeriço em função de T e R_h , com os respectivos R^2 , SQR e ERM.....	82
Tabela 4.6 – Parâmetros do modelo de Midilli e Kucuk ajustados para calcular MR das folhas de manjeriço, com os respectivos R^2 , SQR e ERM.....	90
Tabela 4.7 – Valor médio da umidade das folhas no leito medidas em 12 pontos de amostragem e respectivos desvios padrão; T=45°C; U=1,0m.s ⁻¹ ; R_h médio=73%; M_i =7,55 (b.s.).	103
Tabela 4.8 – Valores médios de densidade <i>bulk</i> solta e compactada, e respectivos desvios padrão para folhas de manjeriço com diferentes comprimentos e teores de umidade.....	111

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Amplitude de vibração	[L]
a, b, c, d, M_m	Parâmetros dos modelos de isotermas de equilíbrio (Tabela 2.2)	[-]
a, b, c, n	Constantes empíricas dos modelos de secagem em camada fina (Tabela 2.1)	[-]
A_c	Área do menor círculo circunscrito ao material	[L ²]
A_p	Área superficial da partícula	[L ²]
A_{proj}	Área projetada da partícula	[L ²]
C	Circularidade	[-]
C_p	Calor específico	[ML ² T ⁻²]
d_c	Diâmetro do menor círculo circunscrito ao material	[L]
d_F	Diâmetro de Feret	[L]
d_i	Diâmetro do maior círculo inscrito ao material	[L]
d_m	Diâmetro médio da partícula	[L]
d_p	Diâmetro da partícula	[L]
d_v	Diâmetro de volume equivalente	[L]
D	Diâmetro do leito	[L]
D_i	Diâmetro médio de abertura de duas peneiras consecutivas	[L]
D_{ef}	Difusividade mássica efetiva	[L ² T ⁻¹]
D_{eq}	Diâmetro equivalente da câmara	[L]
D_s	Diâmetro médio de peneira	[L]
f	Frequência de vibração	[T ⁻¹]
g	Aceleração da gravidade	[L ² T ⁻²]
H_0	Altura do leito fixo	[L]
k, k_0 , k_1	Coeficientes empíricos dos modelos de secagem em camada fina (Tabela 2.1)	[T ⁻¹]
l	Comprimento da partícula	[L]
L	Espessura do leito	[L]
m_i	Massa inicial da amostra	[M]
m_p	Massa da partícula	[M]

M	Conteúdo de umidade em base seca	[-]
\bar{M}	Conteúdo de umidade médio em base seca	[-]
M_e	Conteúdo de umidade de equilíbrio em base seca	[-]
M_i	Conteúdo de umidade inicial em base seca	[-]
P	Perímetro da partícula	[L]
Q	Potência térmica por unidade de comprimento	[ML ⁻² T ⁻²]
R	Raio da curvatura do material	[L]
r'	Raio da curvatura do ângulo mais acentuado do material	[L]
R	Posição radial (na sonda linear)	[L]
R	Raio do maior círculo inscrito ou raio médio do material	[L]
R_h	Umidade relativa do ar	[-]
t	Tempo	[T]
T	Temperatura	[Θ]
U	Velocidade superficial do ar	[LT ⁻¹]
U_{mf}	Velocidade de mínima fluidização	[LT ⁻¹]
U_{mm}	Velocidade mínima de mistura	[LT ⁻¹]
U_{mvf}	Velocidade mínima de vibrofluidização	[LT ⁻¹]
V_b	Volume do leito empacotado	[L ³]
V_p	Volume da partícula	[L ³]
V_s	Volume real do sólido	[L ³]
x_i	Fração mássica do pó retido na peneira	[-]
x	Direção do fluxo difusivo interno de água	[L]
z	Posição axial no leito	[L]
w	Largura da partícula	[L]

SÍMBOLOS GREGOS

A	Difusividade térmica	[L ² T ⁻¹]
δ	Espessura da partícula	[L]
ΔP	Queda de pressão no leito	[ML ⁻¹ T ⁻²]
ΔP_{mf}	Queda de pressão na mínima fluidização	[ML ⁻¹ T ⁻²]
ε	Porosidade	[-]
ε_b	Porosidade <i>bulk</i> do leito	[-]

ε_{mf}	Porosidade do leito na mínima fluidização	[-]
ε_p	Porosidade da partícula	[-]
ε_t	Porosidade total do leito	[-]
γ	Constante de Euler-Mascheroni ($\approx 0,57722$)	[-]
ϕ	Esfericidade da partícula	[-]
κ	Permeabilidade do meio poroso	[L ²]
μ	Viscosidade do fluido	[ML ⁻¹ T ⁻¹]
ρ	Densidade do fluido	[ML ⁻³]
ρ_b	Massa específica do leito de partículas (ou <i>bulk</i>)	[ML ⁻³]
ρ_p	Massa específica aparente da partícula	[ML ⁻³]
ρ_s	Massa específica real da partícula	[ML ⁻³]
Γ	Adimensional de vibração	[-]

RESUMO

A secagem convectiva de folhas envolve os processos de transferência de calor e massa em leitos empacotados de materiais deformáveis, uma vez que as folhas apresentam um elevado encolhimento com a redução da umidade. Desta forma, a estrutura do ‘pacote’ de folhas muda ao longo do tempo de secagem, e as propriedades de transferência também se alteram. Um inconveniente adicional é a dificuldade de se obter ‘pacotes’ reproduzíveis, devido à natureza aleatória dos empacotamentos constituídos por este tipo de material, que tem formatos irregulares. Neste trabalho, uma investigação experimental foi realizada com o intuito de avaliar como as folhas de manjeriço (*Ocimum basilicum* L.) comportam-se durante o processo de secagem, levando em consideração as características desta fase particulada. Uma caracterização completa das folhas enquanto um sólido particulado foi realizada medindo-se suas dimensões características, massa específica, teor de umidade inicial e teor de umidade de equilíbrio. As densidades *bulk* solta e compactada foram medidas para leitos de folhas com diferentes teores de umidade. Os resultados indicam que as folhas de manjeriço possuem baixa esfericidade ($\phi=0,160$), elevada área projetada ($A_{proj}=4,55 \text{ cm}^2$) e massa específica igual a $0,874 \text{ g.cm}^{-3}$. As densidades *bulk* obtidas para as folhas *in-natura* foram iguais a $0,089 \text{ g.cm}^{-3}$ e $0,198 \text{ g.cm}^{-3}$, para os leitos com empacotamento solto e compactado, respectivamente. Experimentos de secagem foram realizados para temperaturas do ar de secagem entre 30 e 60°C, e com os leitos de folhas sendo submetidos a diferentes formas de contato sólido-fluido, incluindo leitos fixos e móveis. Células de secagem com 10,0 cm de diâmetro e com alturas de 1,0 ou 12,0 cm (correspondendo às alturas de leitos com camada fina e espessa, respectivamente) foram testadas com escoamento de ar perpendicular ao material. Nos ensaios de secagem em leitos móveis, uma câmara retangular com área de seção transversal de 20,0 cm x 11,0 cm foi usada, também com escoamento de ar perpendicular às amostras. Nas condições investigadas, problemas com relação à reprodutibilidade das curvas de cinética de secagem, encolhimento do leito, canalização do ar nas proximidades das paredes da célula e secagem não homogênea foram observados. Foi demonstrado que estes problemas aparecem como consequência das características inerentes às folhas (baixa massa específica, elevada relação A_p/V_p , rugosidade superficial, etc.), e também devido à variabilidade biológica, que dificulta a obtenção de ‘pacotes’ de folhas com características similares entre diferentes ensaios. Um produto final seco de forma homogênea foi obtido somente para os ensaios realizados em leitos móveis com vibração vertical, utilizando adimensional de vibração igual a 1,0 e amplitude vibracional de 0,5 cm. O efeito da razão D/d_m

(diâmetro da célula/dimensão média da folha) sobre as densidades *bulk* e taxas de secagem foi também avaliado. Para isto, as folhas inteiras ($D/d_m=4,2$) foram cortadas em duas e em quatro partes (valores de $D/d_m=5,3$ e $7,8$, respectivamente). Verificou-se que as densidades *bulk* médias solta e compactada não variaram significativamente para os leitos de folhas cortadas em duas partes, mas aumentaram em 20% para as folhas cortadas em quatro partes em relação às folhas inteiras. Em relação às taxas de secagem, uma tendência de aumento foi observada quando D/d_m passou de 4,2 para 7,8, mas as diferenças mantiveram-se dentro da faixa de desvios padrão dos dados experimentais. O encolhimento axial dos leitos foi medido durante ensaios de secagem utilizando camadas espessas de folhas. A altura inicial dos leitos de folhas foi reduzida em aproximadamente 47% após cerca de 100 minutos de secagem para os ensaios de secagem realizados a 60°C. Os valores de queda de pressão através do leito diminuíram bastante quando as folhas foram secas, resultando em um aumento de 141 vezes na permeabilidade do leito para a secagem com o uso de $T=60^\circ\text{C}$. Os resultados experimentais obtidos neste trabalho mostram que a estrutura dos leitos de folhas afetam fortemente as transferências de calor e massa que ocorrem durante a secagem das folhas.

ABSTRACT

Convective drying of leaves involves heat and mass transfer in packed-beds of deformable material, since the leaves shrink significantly when the moisture is removed. Therefore, the packing structure changes over time, and the transfer properties alter as well. An additional drawback is the challenge to obtain reproducible packings, given the random nature of packing for such an irregular type of material. In this work, an experimental investigation was conducted to analyze how basil leaves (*Ocimum basilicum* L.) behave during drying focusing in the challenging characteristics of this particulate phase. A full characterization of the leaves as a particulate solid was conducted by measuring their dimensions, specific density, initial moisture content and equilibrium moisture content. Loose and compacted bulk densities were measured for beds of leaves under different moisture content. Results indicate that the basil leaves have a low sphericity ($\phi=0.160$), a high projected area ($A_{\text{proj}}=4.55 \text{ cm}^2$) and density equal to 0.874 g.cm^{-3} . Bulk density of fresh leaves was 0.089 g.cm^{-3} in loosely packed-beds, and 0.198 g.cm^{-3} in compacted packed-beds. Drying experiments were performed in a range of 30 to 60°C under different air-particle contact modes, including fixed and moving beds. Drying cells 10 cm in diameter with heights of either 1 or 12 cm (corresponding to thin-layer and deep-layer beds respectively) were tested with air flowing perpendicular to the samples. In moving beds, a rectangular chamber of dimensions 20 cm x 11 cm was used, also with air flowing perpendicular to the samples. In the conditions tested, problems were observed regarding reproducibility of data of moisture content versus time, bed shrinking, channeling and non-homogeneous drying. It was demonstrated that these problems appear due to the inherent characteristics of the leaves (low density, high ratios of surface area to volume, rough surface, etc.), and also due to their biological variability, which made it difficult to obtain packed-beds with reproducible characteristics in different assays. Homogeneous drying was obtained only for moving beds with vertical vibration, under dimensionless vibration parameter equal to 1.0 and an amplitude of vibration of 0.5 cm. The effect of the cell diameter to mean leaf size ratio (D/d_m) on the bulk densities and drying rates was also investigated. For that, the size of leaves was reduced by cutting them in two parts widthways (half-sized particles), and also in four parts, width- and lengthways (quarter-sized particles), resulting in $D/d_m= 4.2$ (whole leaves), 5.3 and 7.8 (half- and quarter-sized leaves respectively). It was observed that loose and compacted bulk densities did not vary significantly for beds of half-sized particles, but increased approximately 20% in beds of

quarter-sized leaves. Regarding the drying rates, a tendency of an increase as D/d_m was raised to 7.8 was observed, but the variation remained within the range of standard deviation of experimental data. Axial shrinking of the beds throughout drying was measured in deep packed-beds. The initial bed height was reduced by approximately 47% after 100 minutes of drying at 60 °C. The pressure drop through the bed decreased drastically when the leaves were dried, resulting in an increase by 141 times in the bed permeability for drying at a temperature of 60°C. The results obtained show that the packed-bed structure strongly affects the heat and mass transfer during convective drying of leaves.

1 INTRODUÇÃO

A maioria das plantas medicinais e aromáticas é comercializada na forma seca, uma vez que *in-natura* elas são altamente perecíveis. Segundo Radünz (2004), a baixa qualidade e a irregularidade da oferta dos produtos secos nacionais são problemas que dificultam o processamento destes materiais tornando, muitas vezes, necessária sua importação, sobretudo para a produção de cosméticos e medicamentos. A incorporação de tecnologias e a padronização de metodologias de processamento na secagem podem ser úteis para melhorar a qualidade da matéria-prima, o rendimento dos processos e a qualidade do produto final, contribuindo positivamente em diferentes etapas da cadeia produtiva.

Na literatura existem muitos trabalhos que investigam a secagem convectiva de folhas *in-natura* e que avaliam como os princípios ativos (óleos essenciais, flavonoides, taninos, dentre outros componentes de interesse) são afetados pela secagem e pelo armazenamento dos materiais (ÖZCAN; ARSLAN; ÜNVER, 2005; ZHANG; WANG, 2007; PHOUNGCHANDANG; SRINUKROH; LEENANON, 2008, PIN et al., 2009; DIAS; SOUZA, ALSINA, 2011; RAHIMMALEK; GOLI, 2013). Estão disponíveis ainda inúmeras pesquisas voltadas para a obtenção de taxas de secagem em leitos fixos de pequena espessura, nos quais as folhas são expostas ao escoamento de ar em diferentes configurações, velocidades e temperaturas. Nestes trabalhos, dados experimentais de umidade média em função do tempo são ajustados à equações empíricas ou semi-empíricas, sendo obtidas relações que permitem prever a umidade em função do tempo. Vários pesquisadores utilizam esta abordagem para investigar o efeito da temperatura e velocidade do ar para uma imensa variedade de folhas, tais como chá preto e chá mate, hortelã, salsa, manjeriço, endro, oliva, *ivy gourd*, *betel*, etc. (TEMPLE; VAN BOXTEL, 1999b; PANCHARIYA; POPOVIC; SHARMA, 2002; PARK; VOHNIKOVA; BROD, 2002; AKPINAR, 2006; DOYMAZ; TUGRUL; PALA, 2006; ZANOELO; DI CELSO; KASKANTZIS, 2007; PIN et al., 2009; ERBAY; ICIER, 2010b; POTISATE; PHOUNGCHANDANG, 2010).

A formulação baseada na secagem em camada fina simula uma condição ‘ideal’ de secagem, uma vez que os gradientes de temperatura e umidade são pequenos e podem ser desprezados, de forma que as taxas de secagem obtidas equivalem ao limite superior possível para uma dada condição de velocidade e temperatura do ar. Embora útil esta abordagem é limitada pelo fato dos parâmetros ajustados não poderem ser generalizados para outros materiais ou condições de processamento.

O uso de modelos fenomenológicos, contudo, ainda é restrito pela complexidade dos fenômenos envolvidos. Segundo Cui e Grace (2007), as propriedades de folhas, raízes e outros tipos de biomassa são muito diferentes das propriedades de partículas convencionalmente utilizadas em processos envolvendo particulados, havendo necessidade de estudos específicos voltados para a caracterização destes materiais e para avaliação da sua dinâmica em operações unitárias que envolvem contato com fluidos.

As folhas são materiais facilmente deformáveis e irregulares, que encolhem de forma significativa durante a secagem. Assim, os leitos constituídos por folhas tendem a ser pouco reprodutíveis e não homogêneos, e as propriedades *bulk* associadas a este tipo de ‘recheio’ (densidade, porosidade e permeabilidade) podem variar localmente de forma muito acentuada. Devido à acomodação e ao encolhimento do material ao longo do processo (RAMALLO et al., 2001; LIMA; FERREIRA, 2012), as dimensões e o formato das folhas, bem como a própria estrutura do ‘pacote’, são fortemente alterados. Isto agrava a canalização, aumentando a não homogeneidade dos leitos constituídos por folhas, pois, além de variar com a posição no leito, as propriedades *bulk* se modificam também ao longo do tempo no processo de secagem. Embora estes fenômenos sejam conhecidos, uma revisão da literatura indica que eles ainda foram pouco discutidos e faltam análises fundamentais de processos envolvendo a secagem convectiva de folhas e uma avaliação deste tipo de material que considere, de fato, suas propriedades.

No presente trabalho foi efetuada uma análise de como os leitos formados por folhas de manjerição (*Ocimum basilicum* L.) se comportam durante a secagem quando submetidos a diferentes formas de contato sólido-fluido e a diferentes temperaturas do ar de secagem. Uma análise do processo de secagem de folhas associado à razão D/d_m foi também realizada e três tamanhos de folhas foram avaliados. Através da análise dos resultados obtidos, serão discutidas as diversas inconsistências observadas na forma como a secagem de folhas é atualmente abordada na literatura. Pretende-se desta forma contribuir para a compreensão dos aspectos fundamentais do processo de secagem de folhas e para o desenvolvimento de metodologias que permitam uma caracterização adequada das folhas enquanto um material particulado. Estas são etapas indispensáveis para a proposição de modelos adequados para descrever processos envolvendo a secagem de folhas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Plantas aromáticas, medicinais e/ou condimentares

As plantas formam a base das principais cadeias alimentares na Terra e constituem as fontes mais importantes de alimento, proteção e remédio para o homem. Historicamente elas têm sido utilizadas na cura e alívio de enfermidades humanas, com fins cosméticos e com o intuito de melhorar o sabor dos alimentos (RIBEIRO; DINIZ, 2008).

No Brasil, o uso de plantas nativas data de períodos que antecedem ao descobrimento. A variedade de plantas com propriedades aromáticas, medicinais e condimentares é bastante extensa. Segundo Barata e Queiroz (1995), o Brasil é o país com a maior biodiversidade do mundo, abrigando 55 mil espécies de plantas das quais 10 mil podem ser aromáticas, medicinais ou úteis, o que faz do país um mercado promissor em relação ao mundo, uma vez que a grande diversidade de espécies existentes aumenta a oportunidade de identificação de plantas com potencial para se tornarem produtos economicamente viáveis. Isto insere os produtos nacionais em um mercado mundial de produtos farmacêuticos, cosméticos e agroquímicos que soma aproximadamente US\$ 400 bilhões ao ano (BATALHA; MING, 2003).

De acordo com Ribeiro e Diniz (2008), nas últimas duas décadas têm-se observado um forte interesse pelo estudo, uso e cultivo de plantas medicinais no Brasil e no mundo, e que decorre de muitos fatores. A percepção da ineficácia e/ou limitação dos medicamentos sintéticos contra algumas doenças, os efeitos colaterais que acompanham seu uso prolongado, assim como seus preços elevados, têm gerado uma busca cada vez maior por plantas com propriedades medicinais como recurso terapêutico alternativo (RIBEIRO; DINIZ, 2008). No setor de perfumaria e cosméticos nota-se uma tendência do mercado consumidor em adquirir produtos multifuncionais, que além das funções esperadas, ajam, por exemplo, na foto-proteção, hidratação, nutrição e proteção da pele. Esta filosofia tem levado muitas empresas a aumentar o uso de produtos naturais contendo princípios ativos como proteínas, vitaminas e minerais e, também, a uma expansão do uso de princípios ativos botânicos como os óleos e extratos vegetais (AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL, 2009).

Os óleos essenciais são, por definição, misturas complexas de compostos orgânicos voláteis extraídos de partes de plantas através da destilação por arraste a vapor ou extração por solventes. São constituídos, principalmente, por terpenóides, alguns alcoóis, cetonas, aldeídos e hidrocarbonetos, além de compostos aromáticos (ADAMS, 1995), e constituem matéria-prima de grande importância para diversos setores industriais. Nas indústrias alimentícias, por exemplo, são utilizados como condimento e aromatizante de alimentos e bebidas. No setor farmacêutico, os óleos são utilizados em função de suas propriedades terapêuticas, pelas características aromáticas (corrigindo o sabor e odor de medicamentos destinados ao uso oral) e servindo de matéria-prima para a semi-síntese de outros compostos.

Grandes companhias multinacionais como a Boehringer, Bayer, Novartis e Roche têm enorme interesse em comercializar medicamentos fitoterápicos (ALMEIDA et al., 1998). A Merck, por exemplo, possui plantações próprias no Brasil de jaborandi e fava-d'anta para a extração de fitofármacos que são comercializadas no mercado externo (FERREIRA, 1998). A Natura, uma das mais importantes empresas de cosméticos do Brasil, adquiriu o Laboratório Flora Medicinal no Rio de Janeiro para a produção de fitoterápicos e está ingressando de maneira muito ativa neste segmento (BATALHA; MING, 2003).

Apesar do interesse crescente, da situação promissora de mercado e da grande disponibilidade de espécies nacionais existem ainda muitos entraves a serem suprimidos com o intuito de oferecer ao crescente e cada vez mais exigente mercado, produtos confiáveis e de qualidade, obtidos pelo uso de parâmetros agrônômicos adequados e criteriosas etapas de processamento e manipulação (RIBEIRO; DINIZ, 2008).

Para Batalha e Ming (2003), a baixa qualidade da matéria-prima produzida e a variação no padrão desejado são fatores que dificultam a comercialização dos produtos nacionais. Estes problemas ocorrem como consequência do uso de sementes de baixo valor cultural – geralmente produzidas na própria propriedade rural, dos problemas originados nas etapas de processamento das plantas, como secagem e armazenamento inadequados, e da ausência de padronização dos produtos. As características de sazonalidade e a falta de planejamento da produção geram ainda irregularidade na oferta de matéria-prima para as empresas processadoras. Os autores ressaltam a importância de a indústria nacional realizar esforços para reverter esse quadro e, assim, atingir os padrões de qualidade exigidos nacional e internacionalmente, afastando o risco de perder mercado para as empresas internacionais.

A partir de 16 de março de 2004, através da Resolução – RDC n° 48, que dispõe sobre o registro de medicamentos fitoterápicos, a Agência Nacional de Vigilância

Sanitária (ANVISA) passou a exigir, exceto para os fitoterápicos já enquadrados como ‘fitoterápicos tradicionais’, a apresentação de uma série de relatórios que atestem a segurança e a eficácia, bem como as normas de produção e controle de qualidade do produto.

A criação de regras mais restritivas, como a acima citada para a produção de medicamentos fitoterápicos, torna clara a necessidade de estudos em todas as etapas da produção e processamento de plantas, de forma a conduzir a uma matéria-prima vegetal com concentrações desejáveis de princípios ativos, assim como de estudos que comprovem a eficácia dos benefícios atribuídos aos produtos e a segurança de seu uso.

Apesar de possuir tecnologia para produzir medicamentos internamente, o Brasil exporta plantas medicinais para serem processadas no exterior. Isto faz com que a quantidade de medicamentos patenteados pela indústria nacional seja praticamente nula quando comparada à indústria estrangeira (BATALHA; MING, 2003). Na área cosmética, embora o número de pesquisas tenha aumentando nos últimos anos, com a publicação de trabalhos científicos em periódicos nacionais e internacionais, a contribuição brasileira é ainda muito pequena em relação ao grande potencial de mercado cosmético que se encontra em plena ascensão (AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL, 2009).

O aumento da contribuição científica na área pode estimular as inovações tecnológicas e o crescimento do setor, sobretudo para as pequenas e médias empresas que enfrentam dificuldades relacionadas à adoção da tecnologia em suas atividades. A grande defasagem tecnológica e o reduzido investimento em Pesquisa e Desenvolvimento, as torna pouco competitivas em comparação com as grandes indústrias multinacionais (AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL, 2009; BATALHA; MING, 2003).

2.1.1 A espécie *Ocimum basilicum*

É um subarbusto aromático pertencente à família Lamiaceae, anual, muito ramificado, que pode atingir de 30 a 50 cm de altura. Esta espécie, popularmente conhecida como manjeriço ou alfavaca, é nativa da Ásia tropical e foi introduzida no Brasil pela colônia italiana. Apresenta folhas simples, opostas, com forma oval, glabras, membranáceas, com margens denteadas e nervuras salientes, atingindo de 4 a 7 cm de comprimento (LORENZI; MATOS, 2002). Apresenta flores brancas ou rosas, aglomeradas no ápice dos

ramos e dispostas em espigas (DI STASI; HIRUMA-LIMA, 2002). A Figura 2.1 mostra uma fotografia de *O. basilicum*.

Figura 2.1 – *Ocimum basilicum*.



Fonte: Acervo pessoal.

O manjeriço apresenta uso culinário, servindo para condimentar uma grande variedade de pratos, além de ser utilizado pelas indústrias alimentícias no preparo de molhos e temperos. Possui ação terapêutica sendo usado como tônico, aromático e antiespasmódico gástrico (substância que reduz ou elimina câimbras e cólicas) (CRUZ, 1965). O seu uso é ainda recomendado para aliviar espasmos, baixar febres e melhorar a digestão, sendo também efetivo contra infecções bacterianas e parasitas intestinais. Em algumas regiões do país, bochechos e gargarejos com o chá em decocção das folhas são recomendados no tratamento de problemas da boca e garganta (LORENZI; MATOS, 2002). Na Mata Atlântica, utiliza-se o xarope e a infusão das folhas contra tosses e bronquites (DI STASI; HIRUMA-LIMA, 2002).

A análise química de *O. basilicum* revela a presença de taninos, flavonoides, saponinas e cânfora. Seu óleo essencial (0,04-0,4%) apresenta como principais constituintes: linalol, eugenol, timol, metilchavicol, cineol e pireno (LORENZI; MATOS, 2002; RIBEIRO; DINIZ, 2008). O linalol é largamente utilizado pelas indústrias de cosméticos e aromas, estando presente em aproximadamente 70 % dos produtos produzidos por estes segmentos da indústria. A principal fonte de linalol natural é a espécie amazônica *Aniba rosaeodora*, popularmente conhecida como pau-rosa. Esta espécie encontra-se em perigo de extinção e, dessa forma, têm sido realizadas pesquisas com o objetivo de encontrar alternativas à extração do óleo de pau-rosa. O óleo de manjeriço não é tão rico em linalol, mas proporciona substituição adequada e já vem sendo extraído para a produção de linalol por empresas como a Linax, de Votuporanga - SP, que atua no ramo de destilação de óleos essenciais. O eugenol, também presente no óleo de manjeriço, é muito utilizado nas indústrias de perfumaria e,

devido ao seu potencial antisséptico e anestésico, faz parte da composição química de diversos produtos odontológicos.

Diante do potencial de uso de *O. basilicum* e da carência de informações sobre suas propriedades, muitos estudos têm sido realizados com o óleo essencial de manjeriço, seus diferentes extratos e constituintes químicos buscando obter melhor conhecimento acerca de algumas de suas propriedades biológicas (BASSOLÉ et al., 2010; CAROVIĆ-STANKO et al., 2010; CHIANG et al., 2005).

2.2 Secagem

2.2.1 Importância da secagem de plantas aromáticas, medicinais e/ou condimentares

Após a coleta, o material vegetal pode seguir três caminhos: uso direto do material fresco, extração de substâncias ativas da planta fresca ou secagem do material para armazenamento e posterior utilização.

De acordo com Batalha e Ming (2003), no caso das espécies comercializadas na forma fresca, o mercado está vinculado à proximidade de grandes centros urbanos. Por apresentarem elevado conteúdo de umidade (aproximadamente 80%), as plantas se deterioram após um curto período de tempo depois de colhidas devendo ser consumidas ou processadas rapidamente a fim de evitar a decomposição dos compostos de interesse ou até perdas na produção.

Para o grupo de plantas comercializadas na forma seca, que representa a maioria das plantas disponíveis no mercado, não há a necessidade de o produtor estar situado próximo aos grandes centros urbanos ou indústrias processadoras, uma vez que o processo de secagem possibilita a preservação dos materiais, minimizando as perdas no teor e na composição dos princípios ativos e tornando possível seu uso a qualquer tempo, dentro dos prazos normais de conservação (BATALHA; MING, 2003; KAYA; AYDIN, 2009).

O processo de secagem pode ser entendido em linhas gerais, como sendo a remoção de um líquido volátil de um corpo sólido por evaporação (KEEY, 1972). É um método de preservação que, por diminuir significativamente o teor de água das plantas, reduz o desenvolvimento de micro-organismos e a ação enzimática, aumentando a estabilidade e longevidade do produto e permitindo, assim, a formação de estoques reguladores de mercado. Outra vantagem relacionada à secagem de plantas encontra-se no fato de que, com a redução de umidade, o peso e o volume do material são reduzidos, aumentando a facilidade no

transporte, armazenamento e manuseio do produto final, seja ele para consumo direto ou como ingrediente na elaboração de outros produtos. Além disso, a secagem promove um aumento percentual dos compostos ativos de interesse em relação ao peso seco da planta. Özcan, Arslan e Ünver (2005) estudaram o efeito da secagem em estufa (T=50°C) e ao sol sobre o conteúdo mineral de folhas de manjeriço (*O. basilicum*) e, independente do método de secagem empregado, encontraram maiores teores de minerais (Al, Ca, Fe, K, Mg, P e S) nas folhas secas devido ao aumento no conteúdo de matéria seca.

O método de secagem natural, caracterizado pela utilização do sol como fonte de energia, não é aconselhado por ser um processo lento, que demanda extensa área de secagem e depende das condições climáticas locais. A exposição dos produtos ao ar acarreta ainda a contaminação por micro-organismos, insetos e impurezas, como terra e pedaços de corpos estranhos (ERBAY; ICIER, 2010a; SOYSAL; ÖZTEKIN, 1999). Além disso, durante a secagem ao sol, o processo de foto-decomposição ocorre intensamente causando a degradação dos compostos químicos e ocasionando alterações de cor, sabor e odor na planta (MARTINS, 2000). Apesar dos inconvenientes inerentes ao uso deste método, a secagem solar é ainda amplamente utilizada por empregar reduzida tecnologia e uma fonte de energia barata no processo. De acordo com Erbay e Icier (2010a), o número de estudos realizados na última década sobre secagem ao sol confirma, ainda nos dias de hoje, a importância deste método na secagem de produtos alimentícios, dentre eles, plantas com propriedades aromáticas e medicinais.

O maior problema referente à secagem de plantas produtoras de óleo essencial ocorre pela alta sensibilidade dos compostos ativos, que devem ser preservados no produto seco. Além disso, as plantas depois de secas deverão manter as características físicas próximas às das plantas *in-natura* devendo ser observadas a integridade física e a coloração das mesmas, visto que a cor e a aparência têm um papel importantíssimo na aceitação do produto pelo consumidor. Um processo de secagem mal realizado pode causar o comprometimento do material por reduzir seu teor de óleo essencial bem como dos compostos ativos que devem ser preservados na planta desidratada. Além disso, pode alterar sua capacidade de reidratação e provocar alterações indesejáveis na aparência, cor e no odor do produto, impedindo sua comercialização (BARITAUX et al., 1992).

Por possibilitar um maior controle sobre o processo, o uso de secadores mecânicos adequados permite que a secagem seja efetuada de forma mais rápida e uniforme, resultando em produtos padronizados e de melhor qualidade.

Os limites de temperatura do ar de secagem são determinados em função da sensibilidade dos compostos ativos e de suas estruturas armazenadoras, pois, durante o período de secagem à taxa decrescente, o produto tem sua temperatura aumentada, aproximando-se daquela na qual a secagem se desenvolve (MARTINS, 2000). A velocidade do ar de secagem é outro parâmetro extremamente importante para a preservação da qualidade das plantas. Enquanto o uso de uma alta vazão do ar através do produto pode causar degradação dos princípios ativos, para baixas velocidades do ar, o processo de secagem se torna lento podendo levar a alterações no perfil dos constituintes químicos devido à atividade microbiana e enzimática (SILVA; CASALI, 2000). Assim sendo, a combinação desses dois fatores, que interferem diretamente na taxa de secagem, pode contribuir de forma expressiva na diminuição do tempo gasto no processo, impedindo a degradação dos compostos químicos ativos das plantas durante a secagem (MARTINS, 2000).

2.2.2 Generalidades sobre secagem

A secagem é uma operação unitária amplamente utilizada em diversos processos industriais e tem como principal objetivo minimizar o desenvolvimento microbológico e as reações químicas, preservando e aumentando a vida útil de produtos perecíveis. Apesar de seu amplo uso é uma operação bastante complexa, principalmente, devido à dificuldade existente em se descrever as transferências simultâneas de calor e massa envolvidas no processo (KUDRA; MUJUMDAR, 2002). Quanto ao modo de transferência de calor, a secagem é dividida em duas: secagem condutiva e secagem convectiva. Na secagem condutiva há um contato direto entre o elemento que aquece e a amostra. Na secagem convectiva, esse contato é efetuado por um fluido aquecido em movimento.

Industrialmente, a secagem convectiva é a mais utilizada. Durante a secagem convectiva, uma corrente de gás aquecido é colocada em contato com o sólido fornecendo calor e aquecendo a sua superfície. A umidade presente na superfície do material é então evaporada e o vapor d'água formado é removido pelo gás, que torna-se mais úmido à medida que escoa em contato com a superfície do sólido. Pode-se observar, então, a ocorrência simultânea de dois fenômenos: transferência de calor e transferência de massa. A transferência de calor ocorre do agente de secagem (ar aquecido) para o material a ser seco. Parte do calor do ar de secagem proporciona um aumento da temperatura do produto (calor sensível) e parte fornece o calor necessário para a evaporação da umidade (calor latente). Essa transferência depende de condições externas de temperatura e pressão, umidade, vazão e

direção do ar, bem como da área de exposição do sólido (forma física). A transferência de massa ocorre do interior para a superfície do sólido, seguida pela evaporação devido à transferência de calor. A natureza física, temperatura e teor de umidade do sólido influenciam o transporte interno de umidade no material (MUJUMDAR, 2006).

Para que haja a evaporação de umidade na superfície do material durante a secagem, a água deve ser transportada do interior do sólido para a sua superfície. O entendimento dos mecanismos de transferência de umidade que ocorrem durante a secagem é de extrema importância para a correta descrição do processo de secagem e otimização, tanto da qualidade do produto, quanto dos custos de produção (SRIKIATDEN; ROBERTS, 2007).

O processo de secagem é estudado há muito tempo e, nos dias de hoje, já dispomos de excelentes livros e *handbooks* sobre o assunto (KEEY, 1972; KUDRA; MUJUMDAR, 2002; STRUMILLO; KUDRA, 1986), além dos anais do Congresso Mundial de Secagem (*International Drying Symposium, IDS*) realizado bianualmente desde 1978. Têm-se também os anais de congressos regionais como o *Inter-American Drying Conference (IADC)* realizado a cada quatro anos desde 1997. Assim, ao invés de apresentar o assunto de uma forma muito parcial, a revisão sobre secagem será focada apenas na parte a ser usada nesta tese, ou seja, secagem em leitos fixos, fluidizados e vibrofluidizados.

2.2.3 Secagem convectiva em leitos fixos

Na área de meios porosos, o leito fixo é um dos sistemas de contato sólido-fluido de concepção mais simples e um dos mais empregados na indústria química, seja como reator de leito catalítico, adsorvedor, trocador de calor ou secador (FARIA, 1998).

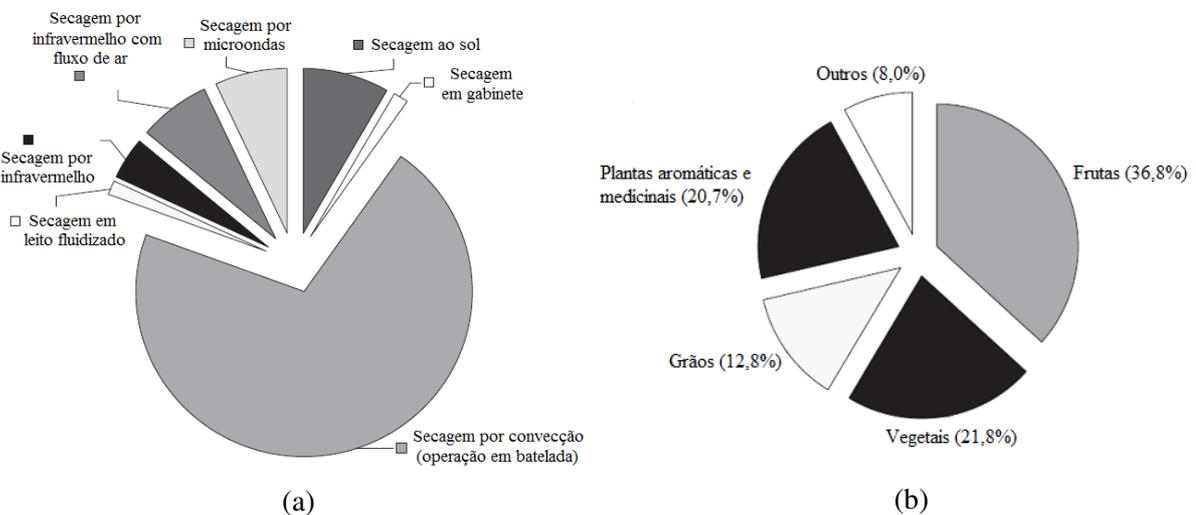
Os secadores de leito fixo se caracterizam por apresentarem baixo custo e serem de fácil operação. As principais vantagens deste tipo de secador estão relacionadas à sua configuração bastante simples, que resulta em baixo custo de implantação, alta eficiência e alta versatilidade, sendo utilizado para a secagem de uma grande variedade de materiais. Como principal desvantagem deste sistema destaca-se a possibilidade de formação de grandes gradientes de temperatura e umidade ao longo do leito (SERENOTTI, 2009).

No processo de secagem em leito fixo, o ar aquecido é forçado a percolar através de um leito estacionário de partículas, trocando calor por convecção e, assim, aumentando a taxa de secagem.

A secagem convectiva utilizando ar quente é um dos processos mais difundidos de transferência de calor e massa, apresentando aplicações em diversos setores industriais e

podendo ser efetuada em uma grande variedade de equipamentos e configurações, dentre eles, o leito fixo. Como mostra a Figura 2.2, que traz uma ilustração mostrando a distribuição dos métodos de secagem usados nos últimos dez anos em estudos sobre a secagem de alimentos, esse método é, também, o mais amplamente estudado na literatura. De acordo com a revisão apresentada por Erbay e Icier (2010a), os secadores convectivos foram utilizados em 70,8% dos experimentos de secagem de alimentos como frutas, vegetais e plantas aromáticas e medicinais.

Figura 2.2 – Distribuição dos (a) métodos de secagem e (b) tipos de produtos alimentícios usados em estudos sobre secagem de alimentos nos últimos 10 anos.



Fonte: Adaptado de Erbay e Icier (2010a).

Do ponto de vista científico-acadêmico, os leitos fixos são muito utilizados, principalmente por permitirem uma análise mais fundamentada dos mecanismos de transferência de calor e massa envolvidos no processo.

Segundo Prado (2004), os estudos de secagem em leito fixo são muito importantes pelo fato deste tipo de leito constituir a base para a compreensão dos fenômenos fundamentais que permeiam os estudos em outros leitos particulados. O autor ressalta que, enquanto os estudos envolvendo os fenômenos fundamentais em meios porosos constituídos por partículas rígidas já apresentam sutilezas de modelação, devido ao alto grau de compreensão atingido, as pesquisas correspondentes aos materiais particulados deformáveis encontram-se em estágios iniciais, na busca de informações sobre como descrever a interação entre as fases fluida e sólida na operação de secagem. Essa escassez de informações sobre o comportamento de materiais deformáveis frente a diferentes condições de secagem faz com que os estudos sobre leitos fixos sejam ainda mais importantes.

Usualmente, os estudos de secagem em leito fixo têm início através do uso de modelos e experimentos utilizando uma camada fina de material. Por camada fina entende-se espessuras onde os gradientes de temperatura e umidade são pouco significativos. Neste modelo, a análise concentrada, típica dos fenômenos de transporte, pode ser usada. Como os mecanismos de transferência em um sistema particulado são muitos e, além disso, são difíceis de serem analisados isoladamente (CHEN, 2007; PERAZZINI; FREIRE; FREIRE, 2012; ZOGZAS; MAROULIS, 1996) define-se um parâmetro efetivo que leva em conta os efeitos de todos esses mecanismos. Este parâmetro é a difusividade efetiva (D_{ef}). Pela grande dificuldade em se estimar a D_{ef} a partir de informações fundamentais básicas da estrutura do meio poroso e de sua interação com o fluido, ele é obtido normalmente via experimentação. Através de sua definição e de seu uso junto a um balanço de massa aplicado a um elemento (meio poroso mais fluido) considerado como um meio pseudo-homogêneo chega-se a uma equação diferencial, que em sua forma unidimensional e considerando o encolhimento desprezível e D_{ef} como um parâmetro constante, toma uma forma similar a da 2ª Lei de Fick (CRANK, 1975):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (01)$$

onde M é o conteúdo de umidade do sólido (kg água/kg de sólido seco), x é a direção do fluxo difusivo interno de água (m), t é o tempo de secagem (s) e D_{ef} é a difusividade efetiva da umidade no leito ($m^2 \cdot s^{-1}$).

2.2.4 Secagem em leitos fixos de plantas aromáticas, medicinais e/ou condimentares

Segundo Erbay e Icier (2010a, 2010b), a secagem convectiva tem sido o método mais amplamente estudado para a secagem de folhas e os experimentos de secagem são, normalmente, conduzidos utilizando leitos fixos e camadas delgadas (ou finas) de material.

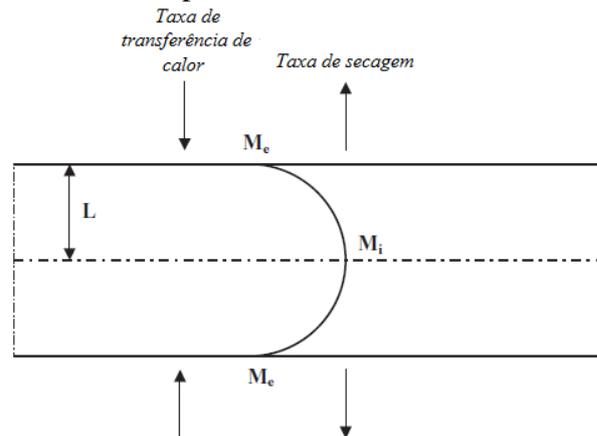
A condução dos experimentos em camada fina permite avaliar a influência das variáveis temperatura e velocidade do ar de secagem nas curvas de cinética de secagem, auxiliando no conhecimento dos mecanismos de transferência de massa envolvidos no processo. Os dados obtidos são, então, ajustados a modelos de secagem em camada fina que permitem a previsão da umidade em função do tempo de secagem. Estes modelos têm sido

amplamente utilizados para descrever o processo de secagem de diversos produtos de origem agrícola e se dividem em teóricos, semi-empíricos e empíricos.

Os modelos teóricos são baseados em equações fenomenológicas e, portanto, permitem interpretação e análises físicas. Contudo, além de dependerem do conhecimento de propriedades físicas e coeficientes de transferência, podem resultar em sistemas complexos de equações de difícil solução. O uso de hipóteses simplificadoras, embora seja uma alternativa para facilitar a resolução das equações, pode levar à perda de generalidade do modelo.

Dentre os modelos de secagem teóricos, Erbay e Icier (2010a) apontam a formulação que resulta na 2ª Lei de Fick (Equação (01)) como a mais largamente utilizada para descrever a secagem de folhas em leitos fixos. Estes autores aplicaram esta formulação para descrever a secagem de folhas de oliva em camada fina, com escoamento de ar paralelo às superfícies da amostra. A Equação (01) foi obtida a partir de um balanço de massa aplicado a um elemento de volume situado no interior de uma camada de folhas com espessura $2L$, assumindo o material como homogêneo, a difusividade efetiva como sendo independente do teor de umidade e o fluxo de umidade unidirecional. Assumindo ainda um teor de umidade inicial uniforme e a resistência superficial desprezível, com as duas superfícies sendo secas, as seguintes condições inicial e de contorno foram aplicadas (Figura 2.3):

Figura 2.3 – Ilustração esquemática do processo de secagem em camada fina com as duas superfícies sendo secas.



Fonte: Adaptado de Erbay e Icier (2010a).

$$t = 0, \quad -L \leq x \leq L, \quad M = M_i \tag{02}$$

$$t > 0, \quad x = 0, \quad \frac{dM}{dx} = 0 \tag{03}$$

$$t > 0, \quad x = L, \quad M = M_e \quad (04)$$

a solução analítica da Equação (01) é obtida através da aplicação do método da separação de variáveis (CRANK, 1975):

$$\frac{M - M_e}{M_i - M_e} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)} \cos\left[\frac{(2n+1)\pi x}{2L}\right] \exp\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right] \quad (05)$$

onde M é o conteúdo de umidade do material em uma dada posição e tempo (kg água/kg de sólido seco), M_e é o conteúdo de umidade de equilíbrio (kg água/kg de sólido seco), M_i é o conteúdo de umidade inicial (kg água/kg de sólido seco), L é a semi-espessura da camada do material (m), D_{ef} é a difusividade efetiva ($m^2 \cdot s^{-1}$), x é a direção do fluxo difusivo interno de umidade (m) e t é o tempo de secagem (s).

Uma integração da Equação (05) de $-L \leq x \leq L$ para obtenção do teor de umidade médio leva à equação (CRANCK, 1975):

$$\frac{\bar{M} - M_e}{M_i - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\left(n + \frac{1}{2}\right)^2 \pi^2 \frac{D_{ef} t}{L^2}\right] \quad (06)$$

onde \bar{M} é o conteúdo de umidade médio do material (kg água/kg de sólido seco) em um dado tempo t .

A difusividade efetiva (D_{ef}) engloba todos os possíveis mecanismos internos de migração de umidade e a determinação desta propriedade é necessária para a solução da equação (06). Quando as curvas de secagem (teor de umidade em função do tempo) e o teor de umidade de equilíbrio são obtidos experimentalmente, D_{ef} pode ser ajustado a partir dos dados usando análises de regressão (KAYA; AYDIN, 2009). Nota-se que, neste caso, a difusividade efetiva passa a ser um parâmetro de ajuste no modelo e deixa de ter significado físico de acordo com a definição utilizada na Equação (01). A solução analítica dada pela Equação (06) só pôde ser obtida, porque, por hipótese, D_{ef} foi considerada constante. Na realidade, em um grande número de aplicações em secagem, a D_{ef} depende do teor de umidade e, nestes casos, tem-se que utilizar outros métodos para a sua obtenção.

Na literatura pode ser encontrada uma série de trabalhos que utilizam o modelo difusivo com D_{ef} constante para descrever o processo de secagem de folhas, como é o caso do

estudo realizado por Kaya e Aydın (2009). Estes autores avaliaram a cinética de secagem de folhas de urtiga (*Urtica dioica*) e hortelã (*Mentha spicata* L.) em camada fina (1,0 cm) para velocidades do ar de secagem entre 0,2 e 0,6 m.s⁻¹, temperaturas de 35, 45 e 55°C e umidades relativas de 40, 55 e 70%. Nas condições investigadas, foram obtidos valores de D_{ef} entre $1,744 \times 10^{-9}$ e $4,992 \times 10^{-9}$ m².s⁻¹ para as folhas de urtiga e de $1,975 \times 10^{-9}$ a $6,172 \times 10^{-9}$ m².s⁻¹ para as folhas de hortelã.

Além do modelo baseado na 2ª Lei de Fick e na difusividade efetiva, existe na literatura um número muito grande de equações empíricas e semi-empíricas para descrever as curvas de cinética de secagem. Estas correlações, embora sejam válidas somente para uma determinada faixa de condições operacionais, são relativamente mais simples e requerem poucas considerações. Baseiam-se, geralmente, na lei de resfriamento de Newton aplicada à transferência de massa e consideram a resistência externa à transferência de umidade entre o material e o ar de secagem. As correlações empíricas apresentam características similares às semi-empíricas, entretanto, os parâmetros destas equações têm validade restrita à faixa de condições do processo em que foram estimadas. Algumas das correlações empíricas mais amplamente utilizadas na literatura para descrever o processo de secagem em camada fina de leitos fixos são mostradas na Tabela 2.1, onde MR é o adimensional de umidade ($MR = (\bar{M} - M_e)/(M_i - M_e)$); t é o tempo (s); a, b, c, n são constantes empíricas dos modelos, e k, k_0 e k_1 são os coeficientes empíricos dos modelos (s⁻¹).

Tabela 2.1 – Correlações de secagem em camada fina.

Equação	Modelo	
Lewis (LEWIS, 1921)	$MR = \exp(-kt)$	(07)
Page (PAGE, 1949)	$MR = \exp(-kt^n)$	(08)
Henderson e Pabis (HENDERSON; PABIS, 1961)	$MR = a \exp(-kt)$	(09)
Logarítmico (CHANDRA; SINGH, 1995)	$MR = a \exp(-kt) + c$	(10)
Dois termos (HENDERSON, 1974)	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	(11)
Midilli e Kucuk (LAHSASNI et al., 2004)	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	(12)

Com o objetivo de mostrar como os trabalhos da literatura especializada tratam a secagem de folhas em leito fixo, alguns trabalhos são descritos a seguir.

Radünz et al. (2002) utilizaram um secador de leito fixo, com três bandejas circulares de diâmetro interno igual a 21 cm e 15 cm de altura para a secagem em camada delgada de folhas de alecrim pimenta (*Lippia sidoides* Cham.). Ar com temperaturas iguais a 40, 50, 60 e 70°C, e velocidade de 1,0 m.s⁻¹ foi utilizado para a secagem de camadas de 10 cm de folhas. Os autores observaram que o aumento da temperatura do ar de 40 para 70°C reduziu o tempo necessário para que o produto alcançasse a umidade final desejada (11% b.u.), sem afetar de forma significativa os rendimentos de extração de p-cimeno e timol do óleo essencial em relação ao material *in-natura*. Entretanto, o rendimento de cariofileno aumentou com o incremento na temperatura do ar de secagem. É importante ressaltar que, embora os autores tenham denominado o processo utilizado como secagem em camada delgada, a altura da camada de folhas utilizada (10 cm) não é característica de camada fina e não há no trabalho informações sobre os gradientes de temperatura e umidade.

A secagem de folhas de chá preto foi investigada por Panchariya, Popovic e Sharma (2002). Os experimentos foram realizados com o objetivo de determinar o efeito da temperatura (80, 90, 100, 110 e 120°C) e da velocidade (0,25; 0,45 e 0,65 m.s⁻¹) do ar de secagem na secagem de 100 g de folhas dispostas em camada delgada em um secador de leito fixo. Os resultados experimentais mostraram que toda a secagem ocorreu no período com taxa decrescente, indicando que, provavelmente, a difusão é o mecanismo físico que governa a migração de umidade nos leitos de chá preto. O modelo de Lewis foi o que melhor reproduziu os dados de secagem em camada fina das folhas de chá.

Doymaz (2006) avaliou o comportamento da secagem em camada fina de folhas de menta (*Mentha spicata* L.) em um secador do tipo gabinete. A influência da temperatura do ar sobre as curvas de secagem foi investigada usando-se temperaturas iguais a 35, 45, 55 e 60°C e mantendo-se a fixa a velocidade do ar (U=4,1 m.s⁻¹) e a massa de folhas utilizada (m=30 g). As curvas de secagem obtidas para as folhas de menta não apresentaram um período com taxa de secagem constante e o uso de maiores temperaturas ocasionou reduções significativas no tempo gasto no processo, que foi finalizado quando o conteúdo de umidade das folhas diminuiu de 84,7% (b.u.) para 10,0% (b.u.). Quatro modelos de secagem em camada fina (Lewis, Henderson e Pabis, Page e modelo logarítmico) foram ajustados aos dados experimentais e, na faixa de temperaturas estudadas, todos os modelos forneceram altos coeficientes de determinação, superiores a 0,98. Contudo, o modelo logarítmico foi o que melhor se ajustou às curvas de secagem das folhas de menta, apresentando coeficiente de determinação mais próximo da unidade e menores valores de qui-quadrado e erro quadrático médio.

O efeito da temperatura sobre a taxa de secagem foi também estudado para folhas de endro (*Anethum graveolens* L.) e salsa (*Petroselinum crispum* L.) em um secador de leito fixo com escoamento de ar perpendicular (DOYMAZ; TUGRUL; PALA, 2006). Em cada experimento foram usadas 200 g de folhas *in-natura*, sendo três temperaturas avaliadas (50, 60 e 70°C) para uma velocidade de ar constante e igual a 1,1 m.s⁻¹. O aumento da temperatura diminuiu consideravelmente o tempo de secagem das folhas. Entretanto, com base nos resultados de análise de cor, a temperatura de 60°C foi considerada a mais adequada para a secagem das folhas das duas espécies. Dentre os modelos avaliados para descrever a cinética de secagem em camada fina das folhas (Lewis, Handerson e Pabis, Page, e Midilli e Kucuk), o modelo de Midilli e Kucuk apresentou, segundo os autores, excelente concordância com os dados experimentais.

Cordeiro (2005) realizou a secagem de folhas de espinheira santa (*Maytenus ilicifolia*) cortadas em comprimento de 5,0 cm e de folhas inteiras de capim-limão (*Cymbopogon citratus*), com comprimentos entre 4,0 e 6,0 cm, em um secador de leito fixo. O autor avaliou a influência das variáveis temperatura (40, 50, 60 e 70°C) e velocidade do ar de secagem (0,7; 1,3 e 2,3 m/s) e verificou ser a temperatura a variável que exerceu maior influência na cinética de secagem das folhas. Nas condições investigadas, o autor não observou degradação significativa dos compostos de interesse (flavonóides totais para as folhas de espinheira santa e teor de óleo essencial para o capim-limão).

Phoungchandang, Srinukroh e Leenanon (2008) estudaram o processo de secagem em camada fina de folhas de *Citrus hystrix* DC., um ingrediente popular na culinária do Sudeste Asiático, utilizando um secador de bandejas. A velocidade do ar de secagem foi mantida constante em 0,5 m.s⁻¹ e o efeito da temperatura foi avaliado (T=40, 50 e 60°C). O uso de T=40°C, embora tenha despendido maior tempo de secagem para que o conteúdo de umidade inicial da amostra fosse reduzido até 7,0% (b.u.), resultou em folhas secas com maiores conteúdos de citronelal. O modelo de Page modificado foi o melhor para descrever o transporte de umidade nas folhas de *C. hystrix*.

Erbay e Icier (2009) utilizaram a metodologia de superfície de resposta para otimizar as condições operacionais da secagem de folhas de oliva (*Olea europaea* L. var Memecik) em um secador de bandejas. Os experimentos de secagem foram realizados utilizando temperaturas na faixa de 40 a 60°C, velocidades do ar de secagem de 0,5 a 1,5 m.s⁻¹ e tempos de secagem de 240 a 480 minutos. Visando obter um produto de maior qualidade e com custos reduzidos, os autores optaram pela solução que resultou em menores perdas no conteúdo fenólico e atividade antioxidante, e que utilizaram menor tempo de processamento.

A condição ótima encontrada para um teor de umidade final inferior a 6% foi: temperatura de 51,16°C, velocidade do ar de 1,01 m.s⁻¹ e tempo de secagem igual a 298,68 minutos.

Outro estudo relativo à secagem de folhas de *O. europaea* em secador de bandejas foi realizado por Erbay e Icier (2010b), utilizando temperaturas de 50, 60 e 70°C e velocidades do ar iguais a 0,5, 1,0 e 1,5 m.s⁻¹. Os autores concluíram que as folhas podem ser secas com sucesso pelo processo de secagem em camada fina e que a taxa de secagem foi influenciada principalmente pela temperatura do ar de secagem. O modelo de Henderson e Pabis modificado foi indicado como o mais apropriado para descrever o comportamento obtido na secagem das folhas de oliva.

Potisate e Phoungchandang (2010) investigaram o efeito da temperatura do ar de secagem sobre a secagem de folhas de ‘ivy gourd’ (*Coccinia grandis* Voigt) *in-natura* antes e após submissão a processos de branqueamento, que têm por finalidade a inativação de enzimas e a fixação da cor das folhas. A secagem em camada delgada foi realizada em um secador de bandejas e as temperaturas avaliadas foram de 50, 55 e 60°C, sendo a velocidade do ar no secador mantida constante (U=0,5 m.s⁻¹). A secagem foi encerrada quando o teor de umidade da amostra foi reduzido para 8,0 % (b.u.). Assim como esperado, os autores observaram o aumento das taxas de secagem com a elevação da temperatura. Além disso, os resultados mostraram que o branqueamento das folhas reduziu o tempo requerido no processo.

O efeito de seis diferentes métodos de secagem (sol, sombra, estufa a 50°C, estufa a 70°C, microondas e liofilização) sobre o teor e composição química do óleo essencial, e a coloração de folhas de tomilho (*Thymus* L.) foi avaliado por Rahimmalek e Goli (2013). A liofilização resultou em maiores rendimentos de óleo essencial (1,7%) e o uso de temperaturas mais elevadas (microondas e estufa a 70°C) levou a um aumento no conteúdo de timol/carvacrol e β-cariofileno. No entanto, apesar do baixo rendimento de óleo essencial obtido na secagem das folhas em microondas (0,89%), este método foi considerado vantajoso, pois reduziu o tempo de secagem, conservou a cor e aumentou o teor dos principais compostos das folhas.

Pela revisão apresentada é possível constatar que os trabalhos sobre secagem de plantas se dedicam, em sua maioria, a estudar o efeito de métodos e variáveis do processo, como a temperatura e a velocidade do ar de secagem, sobre as características do produto seco. Os valores ou faixas de temperaturas e velocidades do ar de secagem variam entre os diferentes estudos e as condições consideradas ideais para a secagem das folhas dependem fortemente da espécie estudada e das características almejadas para o produto desidratado, tais como o teor de umidade pretendido, os compostos ativos que devem ser preservados, a

manutenção da cor, do odor e sabor, dentre outros. Encontram-se ainda muitas investigações voltadas para a obtenção da cinética de secagem em leitos fixos e utilizando camadas finas de folhas, onde a influência das condições do ar de secagem sobre as taxas de secagem obtidas são avaliadas, e equações empíricas são ajustadas aos dados experimentais de umidade com o intuito de se obter modelos que consigam prever satisfatoriamente o comportamento da secagem das folhas. Não foram encontrados, contudo, trabalhos com foco em análises fundamentais sobre a secagem convectiva de folhas. As informações sobre propriedades físicas e comportamento dos leitos quando submetidos à secagem são escassas, com muitas lacunas a serem preenchidas. Até mesmo a altura da camada 'fina' de folhas utilizada nos trabalhos, quando especificada, fica quase que inteiramente a critério de cada autor, o que pode afetar a análise do processo de secagem e a comparação entre os resultados obtidos por diferentes autores.

2.2.5 Secagem de plantas em leitos móveis

Por serem de interesse para este trabalho, serão discutidos aqui os leitos fluidizados e vibrofluidizados. A operação de fluidização existe desde 1926 e foi inicialmente concebida para a gaseificação de carvão. A partir da década de 40, a técnica expandiu-se com a construção do primeiro leito fluidizado para craqueamento de carvão e, atualmente, os leitos fluidizados são usados em diversas aplicações industriais. Como exemplos, têm-se as sínteses e reações catalíticas, a regeneração catalítica, a combustão e gaseificação de carvão, além do emprego em processos não reacionais como na secagem de partículas, no recobrimento e granulação de sólidos, etc. (KUNII; LEVENSPIEL, 1969).

Os sistemas fluidizados gás-partícula são amplamente utilizados na indústria química para a secagem de materiais. Suas principais vantagens estão relacionadas ao fato de que este tipo de secador proporciona um excelente efeito de mistura entre as partículas e o gás, oferecendo, assim, altas taxas de transferência de calor e massa, e resultando em uma secagem bastante homogênea. Na fluidização, o leito inicialmente fixo de partículas sólidas oferece uma resistência ao escoamento do fluido que passa verticalmente através dele e, à medida que se aumenta a vazão de ar, aumenta-se também a força de arraste exercida pelo fluido sobre as partículas. Quando esta força se torna igual ao peso das partículas no leito, as mesmas são suspensas pelo fluido, o leito de partículas se expande e torna-se fluidizado. A velocidade superficial do gás (U) na qual um leito fixo torna-se fluidizado é denominada velocidade de mínima fluidização (U_{mf}). Em um leito fluidizado bifásico, a velocidade de

mínima fluidização pode ser obtida experimentalmente pela intersecção das duas linhas retas que se ajustam aos dados da queda de pressão no leito (ΔP) em função da velocidade superficial do ar. Nesta situação, o ponto em que ocorre a transição de um leito fixo para um leito fluidizado é bem definida e a incerteza dos valores estimados é muito pequena (DALEFFE; FREIRE, 2004).

A aplicação de vibrações mecânicas verticais, horizontais ou inclinadas a um leito fluidizado convencional é realizada a fim de melhorar as propriedades de transporte, especialmente para os materiais considerados de difícil fluidização ou coesivos, e este leito é conhecido como leito vibrofluidizado. Um dos primeiros artigos publicados sobre a aplicação comercial de um leito vibrofluidizado data de 1938, quando Allis Halmers operou uma unidade para secagem de molibdênio (GUPTA; MUJUMDAR, 1980b). Atualmente, os leitos vibrofluidizados têm encontrado numerosas aplicações industriais para a secagem ou processamento térmico de diversos tipos de materiais particulados, além de serem usados como reatores catalíticos heterogêneos, granuladores, resfriadores, para recobrimento de partículas, etc. (MUJUMDAR, 1984).

Segundo Strumillo e Pakowski (1980), a introdução de vibração em um leito fluidizado oferece vantagens em relação a um leito fluidizado convencional, pois aumenta consideravelmente as taxas de transferência de calor e massa, e proporciona uma mistura mais uniforme entre as fases. Mujumdar (1984) afirma ainda que a inserção de vibração possibilita uma maior facilidade no controle do tempo de residência e na intensidade de agitação pela manipulação dos parâmetros vibracionais, além de possibilitar a fluidização de materiais adesivos e pegajosos. A vibração, quando usada corretamente, provoca reduções significativas na rigidez de uma massa de sólidos que apresentam tendência de se aglomerar ou colar uns sobre os outros (como em leitos de partículas pequenas - 0,1 a 0,5 cm, ou de materiais úmidos) rompendo as forças de atração existentes entre as partículas e melhorando, assim, a qualidade da fluidização (DELLA TONIA JÚNIOR, 1990). Zaitsev, Redekop e Shvetsov (1976) observam que a introdução de vibração no leito pode induzir um estado de fluidização impossível de ser obtido somente com o auxílio do escoamento de ar.

A energia vibracional imposta ao sistema é usualmente caracterizada pelo adimensional de vibração (Γ) definido como (PAKOWSKI; MUJUMDAR; STRUMILLO, 1984):

$$\Gamma = \frac{A(2\pi f)^2}{g} \quad (13)$$

onde A e f são, respectivamente, a amplitude e a frequência de vibração e g é a aceleração gravitacional.

Segundo Erdész (1990), Γ pode ser fisicamente interpretado como sendo a relação entre a aceleração média vibracional exercida sobre o sistema e a aceleração gravitacional, e a forma da curva característica de fluidização, comumente utilizada para investigar os efeitos da vibração na estrutura do leito fluidizado, é especialmente dependente da relação entre essas forças que agem sobre o leito (STRUMILLO; PAKOWSKI, 1980).

O parâmetro vibracional (Γ) é frequentemente utilizado na literatura como um parâmetro universal para caracterizar os efeitos da vibração em leitos fluidizados. Entretanto, Daleffe, Ferreira e Freire (2005) realizaram uma série de investigações experimentais sobre o comportamento fluidodinâmico de leitos vibrofluidizados e constataram a existência de diferentes padrões dinâmicos para idênticos valores de Γ . Os autores sugerem que, além deste parâmetro, a amplitude ou frequência vibracional deve ser utilizada para a caracterização completa de uma dada condição operacional.

Para o leito vibrofluidizado, dependendo da faixa dos parâmetros vibracionais utilizados, a transição entre os regimes fixo e fluidizado pode ocorrer em uma considerável faixa de velocidades do gás, dificultando a determinação da velocidade de mínima fluidização pelo uso da metodologia proposta para leitos fluidizados convencionais. Gupta e Mujumdar (1980a) observaram em seus experimentos que a velocidade de mínima fluidização estimada por esta metodologia aumentava com a frequência vibracional. De acordo com os autores, os resultados obtidos eram fisicamente incoerentes, pois a velocidade de mínima vibrofluidização (U_{mvf}) deveria diminuir com o aumento do adimensional de vibração, para uma amplitude vibracional constante. Assim, eles introduziram o conceito de velocidade mínima de mistura (U_{mm}). Esta velocidade é determinada visualmente e é definida como a velocidade a partir da qual as partículas iniciam movimento umas com relação às outras no interior do leito. Entretanto, devido à dificuldade na visualização do momento em que as partículas iniciam movimento, a determinação desta velocidade torna-se, muitas vezes, impraticável. A vibração deve provocar reduções na queda de pressão em leitos vibrofluidizados em comparação aos leitos fluidizados. Mujumdar (1984) realizou um estudo experimental com partículas de polietileno e zeólitas e constatou que a queda de pressão de mínima fluidização diminuiu como resultado da inserção de vibração no leito. Segundo o autor, a extensão da redução depende da altura do leito, da massa específica da partícula e da amplitude vibracional.

2.2.5.1 Comportamento fluidodinâmico de leitos fluidizados e vibrofluidizados

Para um melhor entendimento do processo de secagem, a caracterização do comportamento fluidodinâmico das partículas é de fundamental importância. Desta forma, alguns trabalhos encontrados na literatura que investigam o comportamento fluidodinâmico de leitos operando com partículas não esféricas serão inicialmente apresentados.

Na literatura são encontradas inúmeras correlações para estimar a velocidade de mínima fluidização (LIPPENS; MULDER, 1993; COLTTERS; RIVAS, 2004). Dentre as equações propostas, uma das mais amplamente utilizadas é a correlação empírica de Wen e Yu (1966), válida para esferas na faixa de $(Re_p)_{mf} < 20$:

$$U_{mf} = \frac{(Re_p)_{mf} \mu}{\rho_p d_p} \quad (14)$$

onde:

$$(Re_p)_{mf} = \sqrt{(33,7)^2 + 0,0408 Ar} - 33,7 ; e \quad (15)$$

$$Ar = \frac{(\phi d_v)^3 \rho (\rho_p - \rho) g}{\mu^2} \quad (16)$$

Para leitos fluidizados operando com partículas esféricas ou com formas próximas à de uma esfera, o comportamento fluidodinâmico do sistema, bem como os parâmetros que influem no processo de fluidização, se encontram satisfatoriamente definidos na literatura clássica.

O projeto e a operação de um secador de leito fluidizado devem ser realizados com o conhecimento de alguns parâmetros característicos, dentre eles, pode-se destacar: velocidade de mínima fluidização (U_{mf}), queda de pressão na condição de mínima fluidização (ΔP_{mf}), porosidade do leito fixo (ϵ) e porosidade na mínima fluidização (ϵ_{mf}). Assim, a caracterização fluidodinâmica é importante para o dimensionamento apropriado de equipamentos, juntamente com a definição de parâmetros de operação adequados (KUNNI; LEVENSPIEL, 1991).

Inúmeros fatores podem afetar o comportamento fluidodinâmico de um sistema fluidizado gás-sólido, tais como a geometria do leito, o sistema de distribuição do gás na entrada do leito, altura estática do leito, tipo, tamanho médio e distribuição de tamanhos do sólido utilizado, densidade e coesividade das partículas, etc.. Partículas com tamanhos inferiores a 300 μm , classificadas nas categorias A e B da classificação de Geldart (GELDART, 1973) são consideradas facilmente fluidizáveis e produzem um regime de fluidização homogêneo e estável. Colters e Rivas (2004) ressaltam a forte dependência das propriedades da superfície da partícula na velocidade de mínima fluidização. Segundo os autores, a influência da natureza da superfície das partículas faz com que algumas equações empíricas para predição da velocidade de mínima fluidização sejam válidas em casos específicos, não podendo ser generalizadas.

Liu et al. (2008) realizaram um estudo da fluidização de partículas não esféricas de densidade $\rho_p=1,476 \text{ g.cm}^{-3}$. Eles utilizaram partículas com forma cilíndrica ($\phi=0,80$), cilíndrica com base quadrada ($\phi=0,60$) e semelhantes a placas circulares (esfericidades de 0,70 a 0,85) e constataram uma variação na queda de pressão no leito com a esfericidade para ambos os estágios, de fluidização e desfluidização, sugerindo uma tendência das partículas não esféricas de se acumular no interior do leito, resultando em uma fluidização de má qualidade.

Zhong et al. (2008) investigaram o comportamento fluidodinâmico de leitos fluidizados operando com dois tipos de partículas de biomassa longas e finas: hastes de milho e hastes de algodão. Os resultados mostraram que ‘partículas’ com razão comprimento/diâmetro transversal (l/d_{pt}) acima de um determinado valor não podem ser fluidizadas. Para fluidizar as hastes de algodão, por exemplo, a razão l/d_{pt} deve ser inferior a 18, para um diâmetro transversal igual a 3,4 mm, e inferior a 12, quando $d_{pt}=6,5$ mm. Além disso, os autores encontraram que, independente do valor de d_{pt} utilizado, maiores velocidades de mínima fluidização foram obtidas com o aumento da razão l/d_{pt} .

Gupta e Mujumdar (1980a) avaliaram a influência do tamanho, densidade e fator de forma de partículas em leitos vibrofluidizados. Como partículas planas, eles utilizaram discos de polietileno de densidade *bulk* $0,576 \text{ g.cm}^{-3}$, dimensão média de 0,31 cm e esfericidade igual a 0,55. Segundo os autores, o tamanho e a forma da partícula exerceram efeito de primeira ordem na queda de pressão obtida no leito vibrofluidizado.

Para partículas consideradas de difícil fluidização, que são, segundo Yu e Standish (1993), aquelas com fator de forma entre 0,1 e 0,5, as correlações convencionais utilizadas para a previsão da velocidade de mínima fluidização são improváveis de fornecer

resultados acurados (CUI; GRACE, 2007). Esta perspectiva têm levado muitos autores a enfatizar a necessidade de se considerar a influência do fator de forma (ϕ) e da porosidade do leito na condição de mínima fluidização (ε_{mf}) para a determinação de U_{mf} (COLTTERS; RIVAS, 2004; LUCAS et al., 1986; REINA; VELO; PUIGJANER, 2000). Apesar da dificuldade associada na determinação desses fatores e, assim, das constantes C_1 e C_2 , o uso da equação de Ergun aplicada à fluidização incipiente é considerado por muitos autores como o melhor caminho para relacionar os parâmetros característicos do leito fluidizado (Ar e Re_{mf}), pois leva em conta o tipo de partícula e o comportamento fluidodinâmico do agente fluidizante (REINA; VELO; PUIGJANER, 2000):

$$Re_{mf} = \left[\left(42,857 \frac{C_2}{C_1} \right)^2 + \frac{Ar}{1,75C_1} \right]^{1/2} - 42,857 \frac{C_2}{C_1} \quad (17)$$

onde,

$$C_1 = \frac{1}{\phi \varepsilon_{mf}^3} \quad \text{e} \quad C_2 = \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\phi^2 \varepsilon_{mf}^3} \quad (18)$$

Entretanto, as folhas, além de apresentar baixas esfericidades (inferiores a 0,2), elevadas dimensões e massas específicas reduzidas, são materiais flexíveis e têm alta rugosidade superficial, que são características que também influem no comportamento fluidodinâmico de leitos fluidizados e vibrofluidizados (GUPTA; MUJUMDAR, 1980a; LIMA, 2009; REINA; VELO; PUIGJANER, 2000; VERMA; SAXENA, 1984). Dessa forma, há a necessidade de se estudar o comportamento fluidodinâmico característico destes materiais. Contudo, poucos trabalhos relacionados a leitos fluidizados e vibrofluidizados operando com folhas foram encontrados na literatura consultada e encontram-se descritos no item a seguir.

2.2.5.2 Secagem em leitos fluidizados e vibrofluidizados

Os leitos fluidizados com e sem vibração têm sido largamente utilizados em processos de secagem dos mais diversos tipos de materiais devido à sua versatilidade para operar com materiais em uma larga faixa de tamanhos e por proporcionarem um bom efeito

de mistura, assegurando um excelente contato gás-sólido. Entretanto, a grande maioria dos trabalhos publicados em processos particulados foca a secagem de materiais de formas geométricas regulares ou de pós. Poucos trabalhos sobre o comportamento fluidodinâmico e a secagem de folhas nestes leitos foram encontrados na literatura consultada, sendo que alguns trabalhos significativos são discutidos a seguir.

Temple e van Boxtel (1999a) estudaram parâmetros fluidodinâmicos para a fluidização de folhas de chá preto secas ($d_m=0,084$ cm) utilizando diferentes cargas de leito. Os autores observaram que a elutriação das partículas leves ocorria logo após o início da fluidização, reduzindo as velocidades de escoamento de ar aceitáveis para uma estreita faixa. Além disso, notaram que o projeto da placa distribuidora influenciava a estabilidade da fluidização, sendo que placas com menor percentual de área aberta permitiam que a fluidização fosse atingida para um maior número de cargas do leito. Segundo os autores, fluidização de boa qualidade não foi obtida em todas as condições testadas, não sendo possível, em alguns casos, obter clara transição entre as regiões de leito fixo e expandido. Nas condições onde boa fluidização foi obtida, a velocidade de mínima fluidização ficou entre 0,9 e 1,2 m.s⁻¹.

Zanoelo (2007) realizou um estudo teórico e experimental sobre as resistências simultâneas ao transporte de calor e massa na secagem de folhas de chá mate (*Ilex paraguariensis*) cortadas na forma de quadrados, com lados variando de 0,65 a 1,3 cm e espessura igual a 0,4 cm. Ainda que o objetivo principal do trabalho não fosse caracterizar parâmetros fluidodinâmicos, o autor observa que as partículas de mate, em geral, não apresentaram boa fluidização como consequência da elevada área superficial das mesmas, levando à formação de blocos coesos de folhas no topo do leito. Nos casos em que uma boa fluidização foi atingida, o valor para a velocidade de mínima fluidização permaneceu entre 0,6 e 1,0 m.s⁻¹. A determinação da altura do leito em que o movimento relativo das partículas se iniciava foi possível, pois uma linha horizontal era formada no topo do leito devido às características coesivas das folhas. Assim, a porosidade do leito na condição de mínima fluidização foi calculada e um valor de aproximadamente 0,92 foi encontrado para todas as condições experimentais testadas.

Shah e Goyel (1980) estudaram as características da secagem de folhas de chá verde (cortadas em pedaços) em um leito vibrofluidizado. Nenhuma caracterização do material utilizado, no que diz respeito à forma, dimensões, massa específica, entre outras, foi realizada. Entretanto, as partículas passaram por etapas de emurchamento, enrolamento e fermentação antes de serem submetidas ao processo de secagem. Os autores concluíram que o

chá úmido pode ser efetivamente fluidizado com a adição de vibração, ocorrendo uma exposição extremamente uniforme do chá ao ar quente e, assim, obtendo-se um produto com qualidade superior à do chá obtido em secadores convencionais. Os autores constataram que o grau de fluidização e a qualidade do chá produzido variavam com a frequência e a amplitude vibracional. Produto de boa qualidade foi obtido dentro de uma determinada faixa de excitação, e quando esta era continuamente aumentada, a qualidade do chá diminuía. Além disso, observaram que para valores de percentagem de abertura da placa distribuidora muito altos ou baixos, a taxa de secagem e o grau de fluidização das partículas no leito eram seriamente afetados.

Lima e Ferreira (2011) investigaram o comportamento fluidodinâmico de leitos fluidizados e vibrofluidizados operando com folhas *in-natura* das espécies *Duranta repens*, *Schinus molle*, *Coleus barbatus*, *Buxus sempervirens* e *Bougainvillea spectabilis*, com esfericidades variando de 0,063 a 0,213, massas específicas aparentes de 0,52 a 0,97 g.cm⁻³ e razão A_p/V_p entre 21 e 224 cm⁻¹. Segundo as autoras, devido às características das folhas e elevada não homogeneidade dos leitos, as folhas inteiras não atingiram condições reais de fluidização. As curvas de ΔP em função de U obtidas apresentaram comportamento diferenciado dos reportados na literatura para pós e partículas granulares de esfericidades maiores que 0,5. Entretanto, elas observaram uma expansão do leito para as espécies com menores áreas superficiais (*D. repens*, *S. molle* e *B. spectabilis*), sendo possível a identificação de uma região de transição entre os regimes de leito fixo e ‘expandido’. As velocidades e quedas de pressão obtidas para a região de transição não puderam ser preditas pelas equações da literatura desenvolvidas para estimar as condições de mínima fluidização, pois o leito de folhas inteiras não fluidiza e, assim, o significado físico desta velocidade de transição não é comparável ao definido para a velocidade de mínima fluidização. O uso de vibração foi avaliado para adimensionais de vibração até 1,0 e amplitudes vibracionais de 0,4 e 0,5 cm. A constante agitação do leito melhorou o contato ar-partícula em relação ao obtido na fluidização, reduziu a canalização e contribuiu para a diminuição dos valores de queda de pressão obtidos na região de leito expandido, mas não foi suficiente para assegurar uma boa qualidade da fluidização no leito.

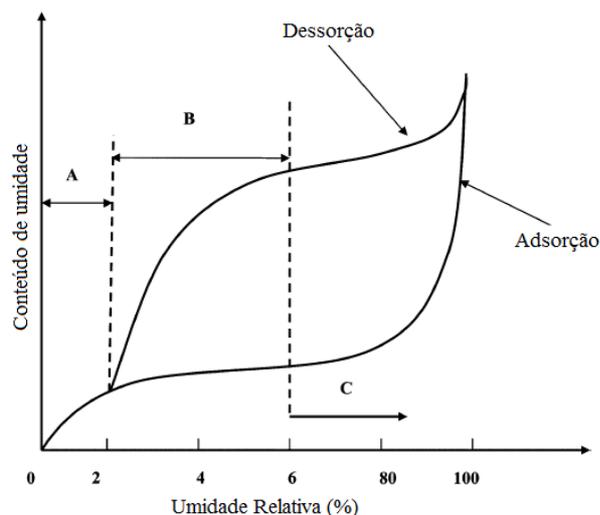
2.3 Umidade de equilíbrio

A umidade de equilíbrio de um material úmido, M_e , é definido como o conteúdo de umidade na qual a pressão de vapor do produto está em equilíbrio com a pressão

de vapor do ambiente. Este é o teor de água que o material úmido atinge depois de exposto por um tempo suficientemente longo a um ambiente com temperatura e umidade relativa constantes.

As curvas que expressam a relação de equilíbrio entre a umidade relativa do ar ambiente e o conteúdo de umidade do material à temperatura constante são denominadas curvas de umidade de equilíbrio ou isothermas de sorção de água. Estas podem ser obtidas pela adsorção de umidade por um material seco (isoterma de adsorção) ou pela dessorção de umidade por um material úmido (isoterma de dessorção). Como mostra a Figura 2.4, as isothermas de sorção para produtos biológicos são curvas do tipo S (sigmóide) que apresentam um aumento acentuado para umidades relativas superiores a 85% (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

Figura 2.4 – Isoterma de sorção típica mostrando o fenômeno de histerese.



Fonte: Adaptado de Basu, Shivhare e Mujumdar (2006).

Devido ao fenômeno de histerese, as curvas de isothermas de adsorção e dessorção raramente percorrem o mesmo caminho, sendo que, para uma determinada atividade de água, os valores de umidade de equilíbrio obtidos no processo de dessorção são superiores aos encontrados na adsorção de umidade. Supõe-se que a histerese seja causada pela contração de volume e quebra molecular interna durante o processo de secagem, o que leva à diminuição dos locais viáveis para a ligação ou reabsorção de umidade (CHUNG; PFOST, 1967).

O efeito da histerese foi observado por Mohamed et al. (2005) no estudo das isothermas de sorção de folhas de laranja amarga (*Citrus aurantium*). De acordo com os

autores, este fenômeno não é totalmente compreendido, embora haja uma aceitação geral de que alguns processos termodinamicamente irreversíveis ocorrem durante a adsorção e/ou dessorção de umidade.

As isotermas de sorção traduzem a higroscopicidade do produto e são ferramentas extremamente valiosas, pois podem ser usadas para prever mudanças potenciais na estabilidade de materiais biológicos. Com o conhecimento das isotermas de sorção é possível estimar mudanças de teor de umidade sob uma determinada condição de temperatura e umidade relativa do ar ambiente. Assim, as isotermas de adsorção são essenciais, por exemplo, para selecionar condições de armazenamento e embalagem adequadas, enquanto os dados das isotermas de dessorção são úteis nas análises de secagem, uma vez que determinam o teor de água mínimo que o produto pode atingir sob determinadas condições (CORDEIRO; RAGHAVAN; OLIVEIRA, 2006).

O método mais amplamente empregado para a determinação do conteúdo de umidade de equilíbrio de um material é o gravimétrico. Neste método, as medidas de umidade da amostra até que esta atinja o valor de equilíbrio são realizadas mantendo-se constantes a temperatura e a umidade relativa do ar. O ar pode ser circulado mecanicamente (método dinâmico) ou se encontrar estagnado (método estático). Uma das principais vantagens do método dinâmico é que ele permite fácil variação da temperatura do ar. Além disso, o tempo necessário para o equilíbrio é pequeno quando comparado ao tempo gasto para se atingir o equilíbrio no método estático, que pode levar semanas (PAPADAKIS et al., 1993). Tradicionalmente, entretanto, o método utilizado na medição das isotermas de sorção é o método estático. A vantagem deste método em relação ao dinâmico reside no fato de que condições termodinâmicas constantes podem ser obtidas com maior facilidade. A obtenção experimental das isotermas de equilíbrio pelo método estático pode ser feita com a utilização de soluções ácidas de concentrações variadas ou soluções salinas saturadas, que são capazes de regular a pressão de vapor nas vizinhanças do material. Devido à maior segurança no manuseio e maior facilidade de manter a umidade relativa constante, o uso de soluções salinas é mais frequente (LABUZZA; KAAANANE; CHEN, 1985).

De acordo com Soysal e Öztekin (1999), espécies agrícolas diferentes apresentam conteúdos de umidade de equilíbrio que diferem sob condições de temperatura e umidade relativa similares. Estas variações nos valores de M_e podem ser atribuídas às diferentes estruturas físicas e químicas dos materiais, que fazem com que, para cada espécie, exista uma função apropriada que descreva o seu comportamento higroscópico.

Nenhuma equação teórica é capaz de prever satisfatoriamente a umidade de equilíbrio em amplas faixas de temperatura e umidade relativa do ar (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992). Este fato tem motivado muitos pesquisadores a buscar na literatura uma equação semi-empírica ou empírica que melhor represente seus resultados experimentais. Dentre as diversas equações utilizadas para expressar o teor de umidade de equilíbrio em função da temperatura e umidade relativa do ar de materiais biológicos, algumas das mais utilizadas pela sua relativa precisão e generalidade de uso encontram-se agrupadas na Tabela 2.2 onde: M_e é o conteúdo de umidade de equilíbrio em % (b.s.), M_E é o conteúdo de umidade de equilíbrio em decimal (b.s.), R_h é a umidade relativa do ar em decimal, T é a temperatura do ar em °C, e a , b , c , d , M_m são parâmetros das equações que dependem da natureza do produto.

Muitos trabalhos foram realizados com o intuito de estudar a relação entre o conteúdo de umidade de equilíbrio de produtos biológicos e a umidade relativa do ambiente, sob determinados valores de temperatura. Nos diversos trabalhos é possível observar o uso de métodos diferenciados para a determinação das isotermas de sorção e a proposição de distintas equações empíricas para a estimativa da umidade de equilíbrio de tais materiais.

Soysal e Öztekin (1999) investigaram as equações que melhor predizem o teor de umidade de equilíbrio de treze espécies de plantas medicinais e aromáticas. Os autores avaliaram alguns modelos empíricos comumente empregados para estimar o teor de umidade de equilíbrio de produtos agrícolas: modelo de Oswin modificado, Halsey e Henderson. Segundo os autores, as equações de Oswin modificada e Halsey descreveram satisfatoriamente a relação entre as condições ambientais e o teor de umidade de equilíbrio das plantas investigadas. Entretanto, o primeiro modelo produziu resultados mais confiáveis quando usado na faixa de temperatura de 5 a 45°C, e o segundo para $T=60^\circ\text{C}$.

O modelo de Halsey foi também o que resultou em melhores ajustes aos dados experimentais da espécie *Phyllanthus amarus*. Na determinação da curva de umidade de equilíbrio ($T=50^\circ\text{C}$) desta espécie, assim como de *P. niruri*, conhecidas popularmente como “quebra-pedra”, Figueira, Silva e Magalhães (2004) utilizaram o método gravimétrico estático, empregando soluções salinas. Entretanto, para *P. niruri*, os autores obtiveram melhores resultados com o uso da equação de GAB.

Segundo Phoungchandang, Srinukroh e Leenanon (2008), muitos pesquisadores constataram que o modelo de Halsey modificado é o que melhor se ajusta aos dados experimentais de plantas tropicais, medicinais e com alto teor de voláteis. Estes autores obtiveram as isotermas de dessorção para folhas da espécie *Citrus hystric* DC. para

temperaturas entre 20 e 49,7°C, e umidades relativas variando de 0,30 a 0,85. Nestas condições e dentre os modelos testados, o de Halsey modificado foi o que melhor se ajustou aos valores experimentais de umidade de equilíbrio ($M_e=f(R_h, T)$) para as folhas de *C. hystrix*.

Tabela 2.2 – Equações de isotermas de equilíbrio.

Equação	Modelo	
Brunauer-Emmet-Teller (BET) (BRUNAUER; EMMETT; TELLER, 1938)	$\frac{1}{M_E} \left(\frac{R_h}{1 - R_h} \right) = \frac{1}{M_{m,d}} + \left(\frac{d-1}{M_{m,d}} \right) R_h$	(19)
Oswin modificado (OSWIN, 1946)	$M_e = (a - bT) \left[\frac{R_h}{(1 - R_h)} \right]^c$	(20)
Halsey (HALSEY, 1948)	$M_e = a \left[T \ln \left(\frac{1}{R_h} \right) \right]^{1/c}$	(21)
Henderson (HENDERSON, 1952)	$M_e = a \left[\frac{1}{T} \ln \left(\frac{1}{1 - R_h} \right) \right]^{1/c}$	(22)
Chung-Pfost (CHUNG-PFOST, 1967)	$M_e = \frac{-1}{b} \ln \left[\frac{(T+c) \ln(R_h)}{-a} \right]$	(23)
Chen-Clayton (CHEN-CLAYTON, 1971)	$M_e = \frac{1}{-cT^d} \ln \left(\frac{\ln R_h}{-bT^a} \right)$	(24)
Henderson-Thompson (THOMSON; PEART; FOSTER, 1968)	$M_e = \left[\frac{\ln(1 - R_h)}{(-a(T+b))} \right]^{1/c}$	(25)
Halsey modificado (OSBORN et al., 1989)	$M_e = \left(\frac{\exp(aT + b)}{-\ln R_h} \right)^{1/c}$	(26)
Peleg (PELEG, 1993)	$M_e = (aR_h^b) + (cR_h^d)$	(27)
Sigma-Copace (CORRÊA; MARTINS, MELO, 1995)	$M_e = \exp[a - bT + c \exp(R_h)]$	(28)
Guggenheim-Anderson-deBoer (GAB) (GARCIA-ALVARADO et al., 1995)	$M_e = \frac{abcR_h}{(1 - aR_h)(1 - aR_h + acR_h)}$	(29)
	onde	
	$a = Ae^{E/T}$	(30)
	$c = Ce^{D/T}$	(31)

Corrêa et al. (2002) determinaram as curvas de equilíbrio higroscópico para as espécies medicinais: guaco, confrei, alcachofra, maracujá e capim-limão. As plantas foram submetidas à dessorção sob temperaturas de 25, 35, 45 e 55°C, e umidades relativas do ar iguais a 0,20, 0,40, 0,60 e 0,75. Para o controle destas variáveis, os ensaios foram realizados

em uma unidade condicionadora de atmosfera Aminco-Aire. Os autores propuseram um modelo matemático para a estimativa da umidade de equilíbrio das plantas estudadas e compararam os ajustes obtidos com esta equação (Equação (32)) aos obtidos pelo uso de cinco modelos matemáticos com aplicação reconhecida na predição de umidade de equilíbrio de vários produtos agrícolas (Chung-Pfost, Oswin modificada, Halsey, Henderson-Thompson e Sigma-Copace).

$$M_e = \frac{1}{(aT^b + R_h^c)} \quad (32)$$

onde M_e representa a umidade de equilíbrio higroscópico (% base seca), T a temperatura do ar (°C), R_h a umidade relativa do ar (decimal) e a , b , c são constantes que dependem da natureza do material.

Embora as equações tradicionalmente utilizadas para prever o processo de sorção tenham resultado em altos valores de R^2 e erros relativos médios baixos, elas apresentaram distribuição de resíduos com comportamento tendencioso. Os autores concluíram ser a Equação (32) a que melhor representou o fenômeno de higroscopicidade das plantas estudadas, pois além de apresentar coeficientes de determinação superiores a 90% e erros médios reduzidos, foi a única a apresentar distribuição aleatória de resíduos.

Silva e Devilla (2005) estudaram o comportamento higroscópico de folhas de louro (*Lauro nobilis*) utilizando quatro níveis de temperatura (20, 30, 40 e 50°C) e quatro níveis de umidade relativa do ar (25, 45, 65 e 85%). Os testes foram realizados utilizando-se uma estufa com circulação forçada de ar e soluções salinas saturadas foram usadas para controlar a umidade do ar em equilíbrio com as amostras. Os resultados mostraram que o modelo de Chung-Pfost foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de umidade de equilíbrio deste material. Os autores constataram ainda que o modelo de Henderson-Thompson foi o que apresentou os piores resultados, mostrando ser pouco indicado para a previsão da higroscopicidade de *L. nobilis*. O modelo proposto por Corrêa et al. (2002) também não se ajustou de forma satisfatória aos dados experimentais de equilíbrio higroscópico obtidos para as folhas de louro ($R^2=0,8923$ e erro médio relativo de 18,82%).

Zanoelo (2005) determinou o conteúdo de umidade de equilíbrio de folhas de mate (*Ilex paraguariensis*) submetidas à dessorção, sob diversas condições de temperatura (30, 40 e 50°C) e umidade relativa do ar variando de 0,11 a 0,75. Soluções saturadas de sais

foram usadas para controlar a umidade do ar em equilíbrio com as amostras de folhas e o comprimento destas foi reduzido à metade para permitir um bom arranjo das partículas nas câmaras de dessorção. Dos seis modelos empíricos avaliados (Henderson, Henderson-Thompson, Chung-Pfost, Chen-Clayton, Halsey modificado e BET), uma análise de regressão indicou ser o modelo de Halsey modificado o que melhor reproduziu os resultados experimentais e o efeito da temperatura e umidade relativa sobre os dados de conteúdo de umidade de equilíbrio para as folhas de *I. paraguariensis*.

Cordeiro, Raghavan e Oliveira (2006) determinaram as isotermas de sorção de folhas de *Maytenus ilicifolia*, popularmente conhecida como espinheira-santa. O conteúdo de umidade de equilíbrio foi medido através do método estático para temperaturas e umidades relativas variando de 30 a 60°C e de 11 a 85%, respectivamente. Para as folhas desta espécie medicinal, a equação de Chung-Pfost foi a que apresentou melhores resultados na previsão dos dados de adsorção. Para os dados de dessorção, o modelo de Henderson-Thompson foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, sendo obtidos valores de ERM=9,8%, SQR=0,015, $R^2=0,96$ e uma distribuição de resíduos aleatória.

As isotermas de dessorção de folhas frescas de ‘ivy gourd’ (*Coccinia grandis* Voigt) foram obtidas por Potisate e Phoungchandang (2010) nas temperaturas de 20, 35 e 50°C e umidades relativas na faixa de 0,30 a 0,75 utilizando um medidor de atividade de água Aqualab 3 TE. Os dados experimentais foram ajustados aos modelos de sorção de Oswin modificado, Henderson modificado, Chung-Pfost modificado e Halsey modificado e o melhor ajuste foi obtido para o modelo de Henderson modificado, com valor de R^2 e erro padrão de estimativa iguais a 0,981 e 0,642 % (b.s.), respectivamente.

Constata-se na grande maioria dos trabalhos, a obtenção dos dados de umidade de equilíbrio por meio do método estático utilizando-se diferentes soluções salinas saturadas e o uso de temperaturas não superiores a 60°C. Além disso, observa-se que não existe um único modelo que possa ser generalizado de forma satisfatória aos dados de equilíbrio higroscópico de todas as espécies. Isso sugere a necessidade de realizar estudos específicos para a determinação das isotermas de sorção de umidade das diversas espécies vegetais.

2.4 Propriedades físicas dos materiais

As propriedades físicas de partículas constituem dados importantes e necessários para a otimização de equipamentos e operações de engenharia, bem como para o desenvolvimento de novos produtos de consumo e avaliação e retenção da qualidade final dos

mesmos (MOHSENIN, 1970). O projeto de equipamentos onde tais propriedades não são levadas em consideração pode levar a aplicações inadequadas, com consequentes perdas de produção e baixa eficiência da operação a que se destina o equipamento (FREITAS et al, 2006).

Os materiais biológicos não possuem a uniformidade apresentada por produtos confeccionados e moldados pela indústria. As variações inerentes a esses materiais tornam o estudo de suas características físicas difíceis de serem consideradas com determinados padrões (MATA; DUARTE, 2002). Dessa forma, muitas técnicas e definições diferentes têm sido utilizadas na determinação das propriedades físicas destes materiais.

2.4.1 Dimensões Características

Informações relativas ao tamanho e forma, entre outras, são importantes para estudos envolvendo transferência de calor e massa e transporte de materiais sólidos por fluidos. Estimativas acuradas da área frontal e dos diâmetros relacionados são essenciais para a determinação, por exemplo, da velocidade terminal, coeficiente de arraste e número de Reynolds (MOHSENIN, 1970).

Uma típica definição científica de tamanho é ‘a quantidade de espaço ocupado’ ou ‘o volume ocupado’. Um corpo regular pode ser descrito por uma forma limitada ou por superfícies bem definidas matematicamente e, assim, o volume pode ser calculado. Para corpos irregulares, entretanto, o tamanho precisa ser medido ou estimado. Dentre as técnicas conhecidas para a determinação das dimensões de um material está a baseada no deslocamento de líquidos, na qual o volume de uma partícula ou de uma amostra contendo um pequeno número de partículas pode ser estimado (TAYLOR, 2002). O volume pode, então, ser associado ao volume de uma forma geométrica conhecida, definindo-se, assim, um diâmetro de volume equivalente. Para o caso de uma esfera, este diâmetro é determinado através da equação:

$$d_v = \left(\frac{6}{\pi} V_p \right)^{1/3} \quad (33)$$

onde d_v é denominado diâmetro de volume equivalente e é definido como sendo o diâmetro da esfera com o mesmo volume da partícula.

Pode-se ainda definir um diâmetro equivalente com base em outra propriedade da esfera como, por exemplo, a área superficial. Zanoelo (2007) estimou o diâmetro equivalente para folhas de chá mate cortadas em quadrados como sendo o diâmetro de uma esfera com a mesma área superficial das partículas de mate por ele estudadas.

A técnica de peneiramento, em que a amostra é agitada através de um conjunto padrão de peneiras, também pode ser utilizada na determinação das dimensões de um material. Esta técnica foi empregada por Temple e van Boxtel (1999a) para a determinação do tamanho médio de folhas de chá preto. Contudo, qualquer definição de tamanho baseada nesta técnica não é clara, sendo incapaz de fornecer informações tridimensionais a respeito da partícula em estudo (TAYLOR, 2002).

Outra técnica frequentemente usada e especialmente importante para o caso de partículas irregulares é a análise de imagens. O uso desta técnica permite a determinação de várias dimensões da partícula como diâmetros de Feret, diâmetro médio, perímetro, área projetada, dentre outras. O tamanho de partículas pode ainda ser determinado medindo-se as dimensões dos três principais eixos do sólido utilizando micrômetros ou paquímetros.

2.4.2 Forma

Tamanho e forma são duas variáveis inseparáveis em um objeto físico e ambos são necessários para que o material seja satisfatoriamente descrito. De maneira geral, muitos parâmetros dimensionais precisam ser medidos para a definição da forma de um material. No caso de materiais irregulares, um número infinito de medidas se torna necessário para uma completa definição de sua forma. Entretanto, do ponto de vista prático, a medida de alguns eixos perpendiculares mútuos é suficiente, se tornando maior à medida que a irregularidade na forma aumenta (MOHSENIN, 1970). Muitos critérios têm sido utilizados para descrever a forma de materiais, dentre eles podemos citar:

- Circularidade (C):

A circularidade é uma medida da intensidade dos cantos ou ângulos do sólido. Muitas definições são propostas para estimar a circularidade, sendo as mais comuns apresentadas abaixo e ilustradas na Figura 2.5 (CURRAY¹, 1951 apud MOHSENIN, 1970):

$$C = \frac{A_{proj}}{A_c} \quad (34)$$

onde A_{proj} é a maior área projetada do objeto na posição de repouso natural e A_c é a área do menor círculo circunscrito. A área projetada pode ser obtida através da técnica de análise de imagens.

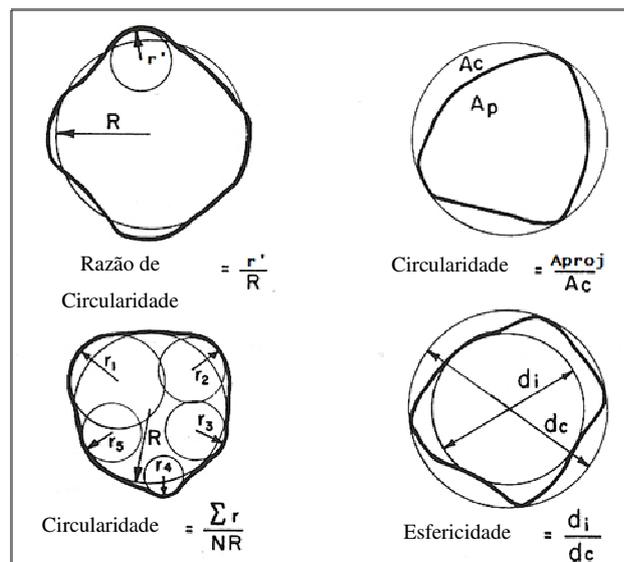
$$C = \frac{\sum r}{NR} \quad (35)$$

onde r é o raio da curvatura como definido na Figura 2.5, R é o raio do maior círculo inscrito e N é o número total de ângulos somados no numerador.

$$\text{Razão de Circularidade} = \frac{r'}{R} \quad (36)$$

em que r' é o raio da curvatura de ângulo mais acentuado e R representa o raio médio do objeto. Este método apresenta o inconveniente de um único raio de curvatura determinar a circularidade do objeto.

Figura 2.5 – Definições de circularidade e esfericidade utilizadas para a descrição da forma de grãos e pedregulhos.



Fonte: Adaptado de Curray¹ (1951 apud MOHSENIN, 1970).

¹CURRAY, J. K. **Analysis of sphericity and roundness of quartz grains**. 1951. MSc. (Thesis in Mineralogy) – The Pennsylvania State University, University Park, PA, 1951.

- Esfericidade (φ):

O embasamento geométrico do conceito de esfericidade repousa sobre a propriedade isométrica da esfera. Curray¹ (1951 apud MOHSENIN, 1970) propõe uma expressão prática tridimensional para estimar a esfericidade de um objeto através da seguinte definição:

$$\varphi = \frac{d_v}{d_c} \quad (37)$$

onde d_v é o diâmetro da esfera de mesmo volume que o objeto e d_c é o diâmetro do menor círculo circunscrito ou, usualmente, o maior diâmetro do material. Esta equação expressa a forma de um sólido relativamente a uma esfera de igual volume.

Outra definição de esfericidade sugerida pelo autor é dada por:

$$\varphi = \frac{d_i}{d_c} \quad (38)$$

onde d_i é o diâmetro do maior círculo inscrito e d_c é o diâmetro do menor círculo circunscrito como mostrado na Figura 2.5.

Massarani (2002) recomenda o uso da definição de esfericidade proposta por Waddel, definida pelo quociente entre a superfície da esfera com o mesmo volume da partícula e a superfície da partícula (A_p):

$$\varphi = \frac{\pi d_v^2}{A_p} \quad (39)$$

onde d_v é o diâmetro da esfera de volume equivalente definido pela Equação (33).

Mohsenin (1970) propõe o cálculo da esfericidade baseando-se na média geométrica dos três eixos perpendiculares ao corpo em relação ao maior eixo do material, conforme a relação:

$$\varphi = \frac{(lw\delta)^{1/3}}{l} \quad (40)$$

em que l , w e δ são, respectivamente, o comprimento, a largura e a espessura do material, e $(lw\delta)^{1/3}$ é o diâmetro médio geométrico da partícula.

Os fatores de forma definidos pelas equações (39) e (40) têm sido extensamente utilizados na literatura para quantificar a forma de partículas irregulares (FREITAS et al., 2006; LIU et al., 2008; REINA; VELO; PUIGJANER, 2000; ZANOELO, 2007).

2.4.3 Massa específica

Para materiais particulados porosos podem ser encontradas três definições de massa específica, as quais são apresentadas a seguir.

A massa específica real é aquela dada pela razão entre a massa do material (m_p) e o volume real do sólido (V_s):

$$\rho_s = \frac{m_p}{V_s} \quad (41)$$

A massa específica aparente é aquela obtida a partir da relação entre a massa e o volume da partícula (V_p), incluindo seus poros abertos e fechados, dada pela equação:

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (42)$$

onde m_p é a massa da partícula e V_p é o seu volume aparente.

A massa específica do leito de partículas ou densidade *bulk* é aquela obtida pela razão entre a massa de partículas e o volume do leito empacotado (V_b), que depende não apenas do volume das partículas e de seus poros, mas também dos espaços vazios entre as partículas do leito empacotado:

$$\rho_b = \frac{m_p}{V_b} \quad (43)$$

Materiais sólidos e que apresentam formatos regulares podem ter sua massa específica rapidamente determinada, pois a obtenção do volume pode ser feita através de medidas diretas nas dimensões do objeto. Entretanto, a dificuldade na determinação do volume aumenta quando o sólido particulado apresenta forma irregular e natureza porosa.

Para a determinação da massa específica real da partícula, podem ser utilizados os métodos de deslocamento de líquido ou de gás. O primeiro método é o mais simples e envolve a imersão de uma quantidade de partículas em um líquido, comumente água, hexano ou tolueno. Entretanto, esta técnica não é a mais adequada para determinar a massa específica real de muitos materiais porosos, devido à possível absorção dos líquidos utilizados e à dificuldade apresentada por líquidos que possuem alta tensão superficial em penetrar os poros dos materiais. Em razão destes problemas, muitos pesquisadores têm determinado a massa específica real de materiais particulados utilizando picnômetros gasosos. O instrumento baseia-se no princípio de Arquimedes de deslocamento, em que o gás é capaz de penetrar em todos os poros abertos maiores que o diâmetro de sua molécula. Normalmente, gás hélio é usado nos experimentos. Devido ao seu pequeno raio atômico (3 Å), apenas poucos poros fechados das partículas não são atingidos pelas moléculas de hélio (CHANG, 1988).

O volume aparente de muitos materiais de formato irregular é também calculado pela técnica do deslocamento de líquido. Entretanto, o uso desta simples técnica utilizando a água como líquido de referência pode resultar em erros apreciáveis para materiais altamente higroscópicos (MOHSENIN, 1970). Assim, na escolha do líquido a ser utilizado deve-se levar em consideração a interação existente entre o sólido e o líquido, com o intuito de evitar que este seja facilmente absorvido, influenciando na determinação da massa específica do sólido. Devido à baixa tendência de penetrar no interior dos sólidos, solventes orgânicos têm sido utilizados para a determinação da massa específica aparente de materiais.

Para a determinação da densidade *bulk* (ρ_b) deve-se considerar as condições utilizadas no empacotamento do leito. Duas definições são comumente utilizadas para caracterizar leitos empacotados de partículas: a densidade *bulk* aerada ou ‘solta’ é definida pelo volume ocupado por uma massa conhecida de partículas quando o material é ‘solto’ no recipiente apenas sob a ação da gravidade. Quando o material é compactado, forçando-se a acomodação das partículas, a medida aferida é denominada densidade *bulk* compactada ou ‘densa’ (ABDULLAH; GELDART, 1999; GERMAN, 1989).

2.4.4 Porosidade

A percentagem de vazios em uma massa de sólidos não consolidados é frequentemente necessária para estudos envolvendo escoamentos de ar e transferência de calor, bem como em outras aplicações (MOHSEIN, 1970). Baseando-se nas definições de massa específica, pode-se distinguir três tipos de porosidade: porosidade da partícula, porosidade *bulk* e porosidade total do leito.

A porosidade da partícula é dada pela razão entre o volume de poros abertos da partícula e o seu volume total e pode ser calculada pelo uso da equação:

$$\varepsilon_p = 1 - \frac{\rho_p}{\rho_s} \quad (44)$$

A porosidade *bulk* é entendida como os espaços aleatórios formados pelo agrupamento de um produto em um volume pré-determinado e pode ser calculada através da relação entre o volume de vazios de ar interpartícula e o volume total do leito:

$$\varepsilon_b = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (45)$$

A porosidade total do leito é dada pela relação entre o volume de poros abertos das partículas e os vazios interpartículas, e o volume total do leito e pode ser calculada através da seguinte equação:

$$\varepsilon_t = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (46)$$

A porosidade em um leito empacotado pode ser afetada por muitos fatores, como tamanho e forma da partícula, distribuição de tamanhos das partículas, textura superficial, aglomeração, segregação e coesão, tamanho do compartimento e procedimento utilizado no empacotamento das partículas no leito, dentre outros (GERMAN, 1989).

Com exceção de alguns casos, a porosidade do leito está relacionada à sua permeabilidade, que é a propriedade que tem a matriz porosa de permitir a passagem de fluidos através de seus vazios ou interstícios sem se deformar estruturalmente ou ocasionar o

deslocamento relativo de suas partes, o que torna o conhecimento dessa propriedade de fundamental importância em estudos envolvendo secagem.

2.4.5 Condutividade térmica efetiva

A condutividade térmica (k) dos materiais é um parâmetro cujo conhecimento é importante para a maioria dos processos térmicos, apresentando relação com o dimensionamento e otimização de equipamentos, conservação de energia, caracterização de substâncias, dentre outras aplicações de interesse científico e comercial (PIETROBON, 1988).

A condutividade térmica é uma propriedade de transporte característica do material que indica a taxa pela qual a energia térmica é transferida por difusão. Para meios porosos, entretanto, o conceito de ‘condutividade térmica efetiva’ torna-se mais apropriado para caracterizar a resistência do leito à transferência de calor, pois, neste caso, a condutividade do meio depende da condutividade térmica e das propriedades radiantes do material sólido, bem como da natureza e fração volumétrica de ar ou do espaço entre as partículas. Na condutividade térmica efetiva, os diversos mecanismos de transferência de calor (condução através do material sólido, condução ou convecção através do ar nos espaços vazios, etc.) são considerados e simplificados, sendo representados por um único mecanismo condutivo ‘efetivo’ (INCROPERA; DEWITT, 2003).

De forma geral, os diversos métodos utilizados para a obtenção da condutividade térmica são classificados em métodos de transferência de calor no regime permanente e métodos no regime transiente (GUBULIN; FREIRE, 1990).

As técnicas de medição em regime permanente não são recomendadas para a determinação da condutividade térmica de materiais biológicos, pois apresentam a desvantagem de requerer longos períodos de tempo para a realização do experimento, podendo acarretar numa migração de umidade da amostra no caso do material úmido. Dentre as técnicas que operam no regime transiente, o método experimental da sonda linear tem sido bastante utilizado para a determinação da condutividade térmica de alimentos (FREIRE, 1981; KUROZAWA et al., 2008; PEREIRA, 2010; SINGH; GOSWAMI, 2000; VIEIRA, 2012).

O método da sonda linear supõe uma fonte linear e contínua de calor imersa em um meio cilíndrico infinito, isotrópico e homogêneo, cujas constantes se quer determinar. Uma taxa de aquecimento linear é aplicada à resistência por passagem de uma corrente de

baixa intensidade e o aumento da temperatura é, então, medido nas proximidades da fonte de calor em função do tempo (GUBULIN; FREIRE, 1990; PIETROBON, 1988).

Partindo da equação de condução de calor e utilizando as hipóteses de (i) fio longo e muito delgado, (ii) amostra de teste finita e grande, (iii) geração de calor constante no fio e (iv) propriedades uniformes da amostra de teste, e as condições de contorno (i) fluxo de calor ‘q’ constante no eixo de simetria do cilindro, (ii) temperatura constante ‘T₀’ para o raio tendendo a infinito, e condição inicial (iii) temperatura inicial T=T₀, a solução analítica obtida é dada pela seguinte equação (PIETROBON, 1988):

$$T - T_0 = -\frac{q}{2\pi k_{ef}} \left[\gamma + \ln\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^i}{i(i!)} \left(\frac{r}{\sqrt{4\alpha t}}\right)^{2i} \right] \quad (47)$$

onde q é a potência térmica por unidade de comprimento (W.m⁻¹), γ é a constante de Euler (0,5772156649), r é a posição radial na sonda (m), α é a difusividade térmica da amostra (m².h⁻¹) e t é o tempo (s).

Para grandes valores de t, a série tende a zero. Desta forma, a solução pode ser truncada até o logaritmo natural, desprezando-se os demais termos e, assim, a condutividade térmica da amostra de teste é expressa como:

$$\frac{\partial T}{\partial \ln(t)} \cong \frac{q}{4\pi k_{ef}} \quad (48)$$

A partir do coeficiente angular da reta de ajuste aos dados de temperatura em função do logaritmo do tempo, para tempos longos, é possível obter, então, a condutividade térmica efetiva (k_{ef}), que para um meio poroso é função de vários fatores como a condutividade térmica da substância sólida e do fluido que preenche os vazios, a fração de vazios e a densidade volumétrica.

2.4.6 Calor específico

O calor específico é uma propriedade que relaciona a variação de entalpia de um sistema com a variação de temperatura em um processo isobárico (SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2007). Neste sentido, é um parâmetro termodinâmico importante para a

determinação da quantidade de energia a ser adicionada ou removida durante processos que utilizam aquecimento e resfriamento, respectivamente.

Dentre os métodos existentes para a determinação do calor específico, os usualmente empregados são o método das misturas e a calorimetria de varredura diferencial, também conhecida pela sigla DSC (*Differential Scanning Calorimetry*).

O método das misturas consiste em estabelecer o equilíbrio térmico de um meio isolado de capacidade calorífica conhecida (normalmente, um líquido inerte) após a adição ao sistema do material cujo calor específico deseja-se conhecer. O caráter estático desta análise impossibilita a obtenção de uma relação do calor específico com a temperatura (MOHSENIN, 1980).

Na calorimetria de varredura diferencial, por outro lado, o material analisado e um material de referência são submetidos a variações controladas de temperatura. A partir da taxa de transferência de calor à amostra e à referência, e da variação da temperatura das mesmas, pode ser obtido o calor específico do material, dentre outros parâmetros importantes. A natureza dinâmica do método de DSC permite a determinação do calor específico como uma função da temperatura (SINGH; GOSWAMI, 2000).

2.5 Empacotamento e caracterização de meios porosos

Operações envolvendo sistemas particulados constituídos por partículas não esféricas são comuns em aplicações industriais. Contudo, ao contrário do que ocorre no caso de esferas, a caracterização de meios porosos constituídos por partículas de formato irregular ainda não está bem posta na literatura, embora vários estudos experimentais e teóricos tenham sido publicados neste tema (GERMAN, 1989; YU; STANDISH, 1993; ZOU; YU, 1996; ZHANG et al., 2006). Por outro lado, não foram encontrados na literatura consultada, trabalhos focados na caracterização detalhada de leitos constituídos por materiais particulados naturais, como é o caso de folhas.

Observa-se que a caracterização completa de um meio poroso requer a determinação de diversas propriedades como a densidade *bulk* e porosidade médias, definidas nos itens 2.4.3 (Equação (43)) e 2.4.4 (Equação (45)), a condutividade térmica efetiva, definida no item 2.4.5, além da permeabilidade, conectividade, tamanho de poros, dentre outras. A maioria destas propriedades é de difícil determinação, particularmente no caso de partículas irregulares. A Equação (43), por exemplo, pode ser usada para obter experimentalmente uma boa estimativa da densidade *bulk* média de um leito estático

tridimensional, assumindo-se que os efeitos de parede sejam desprezíveis e que o leito seja homogêneo, suposições que não necessariamente se aplicam no caso de leitos formados por materiais particulados naturais.

Segundo German (1989), características como tamanho e forma das partículas, distribuição de tamanhos, textura superficial, coesão e aglomeração, tamanho do recipiente e até a forma de empacotamento, são determinantes nas propriedades do meio poroso. As principais dificuldades consistem em entender e descrever como todas estas características afetam tais propriedades.

Alguns estudos envolvendo a caracterização de leitos porosos constituídos por partículas irregulares serão discutidos a seguir.

Zou e Yu (1996) realizaram um estudo experimental com o intuito de avaliar o efeito da forma da partícula nas características do leito, como a porosidade. Duas condições de empacotamento aleatório foram utilizadas – denso e solto, além de diferentes formas de partículas. As partículas foram, inicialmente, derramadas em um recipiente cilíndrico utilizando um funil. Para produzir o empacotamento solto, o cilindro foi colocado na posição horizontal e lentamente girado em torno de seu eixo, retornando, em seguida, para a posição vertical. Para o empacotamento denso, foram realizadas batidas verticais do cilindro até que nenhuma variação no volume fosse observada. Os resultados mostraram que as porosidades iniciais foram fortemente dependentes da forma da partícula e do método de empacotamento. De maneira geral, para leitos com densidade de empacotamento ‘solta’, a porosidade inicial diminuiu com o aumento da esfericidade, e para leitos ‘compactados’, a porosidade inicial diminuiu até um valor mínimo e, então, aumentou com o aumento da esfericidade.

Zotin (1985) determinou experimentalmente o perfil de porosidade para leitos fixos de partículas não esféricas (cilindros de plástico, anéis de Raschig cerâmicos e lascas de basalto). Anteriormente às medidas de porosidade média, ela avaliou diferentes técnicas de empacotamento baseando-se na reprodução e homogeneidade dos leitos e utilizando como recheio esferas de vidro ($d_p=3,0$ mm) e de chumbo ($d_p=2,3$ mm), e uma célula de medida de 5,0 cm de diâmetro. Três técnicas de empacotamento foram avaliadas: (i) partículas soltas ao acaso, utilizando um tubo concêntrico à coluna preenchido com recheio e retirado vagarosamente; (ii) derramamento de uma quantidade fixa de partículas, em etapas, de tal forma que todas viessem a sofrer a mesma altura de queda, que foi conseguida com o uso de anéis de várias alturas para acoplamento no topo do leito e (iii) análogo ao anterior, acrescido de inúmeras batidas na coluna após cada adição de partículas. Segundo a autora, a técnica

número (iii) mostrou-se a mais adequada para o estudo da porosidade média, pois permitiu a formação de leitos mais compactos, reprodutíveis e homogêneos.

De modo geral, a autora observou que leitos preenchidos com esferas e partículas cilíndricas apresentaram perfis radiais de porosidade altamente oscilatórios, com o amortecimento atingido em uma distância de aproximadamente 3 diâmetros de partícula, a partir da parede. Para anéis de Raschig e lascas, o perfil obtido foi praticamente uniforme, fato associado ao formato mais irregular da partícula quando comparada a uma esfera, permitindo uma melhor acomodação no interior do leito. As razões D/d_p (razão entre o diâmetro da coluna e o diâmetro da partícula) críticas, abaixo das quais o efeito da parede é significativo, foram menores para partículas irregulares. Os valores obtidos para leitos de anéis de Raschig e leitos de lascas foram de 7 e 8, respectivamente, enquanto os valores encontrados para cilindros e esferas foram de 16 e 24, respectivamente. Esta característica do perfil de porosidade ocorre, principalmente, pelo contato entre as partículas e as paredes do leito, forçando esta primeira camada de partículas a se ordenar. A partir daí, a ordenação diminui gradativamente à medida que se distancia da parede, resultando em um leito com elevada porosidade e permeabilidade junto às paredes, e uma região central com menor porosidade (SINGULANI, 2001).

Zhang et al. (2009) avaliaram o efeito de diferentes técnicas de empacotamento na porosidade *bulk* de leitos constituídos por cilindros equiláteros de 1,8 mm de diâmetro. As técnicas de empacotamento utilizadas foram: (i) cilindros ‘soltos’ em um recipiente cilíndrico com água; (ii) derramamento dos cilindros no interior do recipiente (com ar); (iii) derramamento dos cilindros e posterior agitação do recipiente; (iv) análogo ao anterior, sendo o recipiente exposto a um grau de agitação diferente, e (v) derramamento dos cilindros no recipiente, seguido por inúmeras batidas nas paredes deste utilizando uma haste metálica rígida. Os autores observaram que as porosidades médias nos leitos variaram de 0,285 (empacotamento (v)) a 0,406 (empacotamento (i)). Além disto, as porosidades obtidas para as regiões próximas às paredes da célula foram maiores que as porosidades no interior do leito, exceto para os leitos cujas técnicas de empacotamento resultaram em maiores densidades *bulk* (técnicas de empacotamento (iv) e (v)). Para estes, as porosidades foram quase que uniformes ao longo da secção transversal do leito, embora a estrutura do pacote na região próxima à parede fosse significativamente diferente da obtida em seu interior. Dessa forma, os autores indicaram ser a técnica de empacotamento e a proximidade com as paredes do recipiente, os principais fatores que afetam a estrutura dos pacotes.

Montillet e Le Coq (2001) analisaram os efeitos do topo, da base e da parede lateral de um leito cilíndrico nos perfis axiais e longitudinais de porosidade através do estudo de seções transversais e longitudinais de leitos empacotados com partículas anisotrópicas: cilindros longos (altura/diâmetro=5,29) e paralelepípedos planos de base quadrada (espessura/lado=0,209), consolidados com resina. Os autores observaram variações locais da porosidade radial em cortes transversais sucessivos dos leitos, mostrando serem estas variações de natureza aleatória. Os dados obtidos foram comparados com os de leitos constituídos por esferas e foi observado que a influência da parede na porosidade radial foi menor para os leitos de partículas anisotrópicas, o que pode indicar que os perfis de velocidade radiais em leitos com estas partículas seriam pouco influenciados pelas paredes laterais do leito. Os autores concluíram ainda ser o efeito da base do leito na variação longitudinal da porosidade, em termos de diâmetros de esfera equivalente, maior do que o observado para leitos de esferas. O efeito da superfície superior foi uma porosidade média mais elevada em uma espessura de dois a três diâmetros de esfera equivalente, dependendo do leito. Segundo os autores estes resultados são consistentes com os obtidos por diversos autores para leitos fixos de diferentes formas de partículas.

Diante do exposto na revisão apresentada neste capítulo constata-se que muitos estudos sobre a secagem convectiva de folhas foram encontrados na literatura, focados principalmente em investigar o efeito da secagem e dos parâmetros U e T sobre propriedades como o teor e a composição química de óleos essenciais, cor e conteúdo de umidade final do material. Foram encontradas, também, muitas pesquisas voltadas para a determinação de curvas de secagem, onde os dados experimentais são ajustados a equações empíricas para se obter a que melhor prevê os dados de umidade em função do tempo. Nestes estudos, os leitos constituídos por folhas são ‘tratados’ como leitos convencionais, formados por partículas com formas regulares e que não se deformam. Isto torna evidente a necessidade de realizar estudos fundamentais sobre secagem de folhas que considerem este tipo de material com todas as suas características peculiares, como tamanhos extremos, formas irregulares, texturas superficiais muito rugosas, alta capacidade de deformação, dentre outras. Sabe-se que estas características exercem forte influência nas estruturas de leitos de partículas e vão influir diretamente nos comportamentos obtidos durante os processos de secagem. Uma caracterização física adequada deste tipo de material também se faz necessária, pois, a despeito de sua importância, estudos voltados para a caracterização detalhada destes materiais não foram encontrados na literatura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

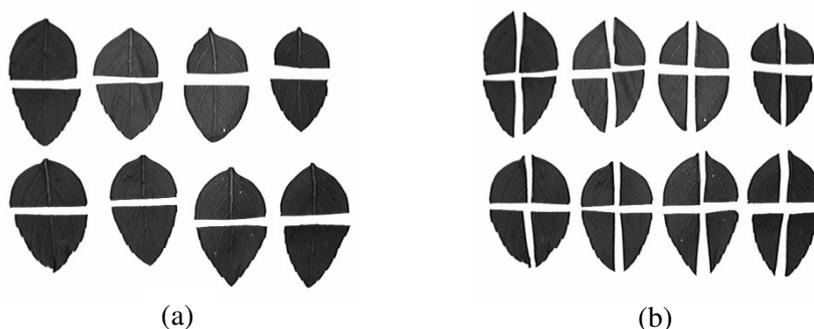
Neste capítulo serão apresentados os materiais, equipamentos e metodologias utilizados nos experimentos realizados no desenvolvimento deste trabalho, bem como os métodos empregados para a análise dos resultados.

3.1 Material e caracterização

As folhas de manjeriço, adquiridas no comércio local de São Carlos/SP, foram selecionadas retirando-se as partes doentes e danificadas, assim como qualquer material estranho. Em seguida, as folhas foram submetidas a uma nova seleção com o intuito de reduzir a variabilidade natural no que concerne à forma e dimensões.

Nos experimentos realizados neste trabalho foram utilizadas, além das folhas de manjeriço inteiras, folhas em diferentes tamanhos. Quando necessário, as folhas foram cortadas manualmente em duas partes (corte na direção da largura) e em quatro partes (cortes nas duas direções – largura e comprimento), conforme mostram as fotografias da Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fotografias das folhas cortadas em (a) duas e (b) quatro partes.



Fonte: Acervo pessoal.

3.1.1 Propriedades físico-químicas

As folhas foram caracterizadas em função de suas dimensões características, espessura média, massa específica, área superficial, esfericidade, conteúdo de umidade inicial, teor e composição química do óleo essencial. A condutividade térmica e o calor específico do material foram também determinados.

As dimensões características de trinta folhas – diâmetros de Feret (d_F) máximo e mínimo, diâmetro médio (d_m), perímetro (P) e área projetada (A_{proj}) – foram obtidas através da técnica de análise de imagens utilizando o software Image Pró-Plus 3.0 e o valor médio obtido foi utilizado.

A espessura foi obtida usando-se um paquímetro digital Caliper de 0,01 mm de precisão. Cinco pontos da superfície de trinta folhas foram medidos e o valor médio foi utilizado.

O volume aparente das folhas foi determinado pela técnica de picnometria líquida usando-se o hexano como líquido de referência. A diferença entre o volume do picnômetro e o volume ocupado pelo hexano fornece o volume ocupado pela amostra sólida. O volume médio de cada folha foi calculado dividindo-se o volume total pelo número de folhas contidas na amostra.

A massa específica aparente das folhas (ρ_p) foi calculada pela relação entre a massa das folhas (m_p) e o seu volume aparente (V_p), usando-se a Equação (42).

A massa unitária média de cada folha (m_p) foi determinada pesando-se trinta folhas em balança digital AND modelo FR200 (precisão de $1,0 \times 10^{-4}$ g) e, então, dividindo-se a massa total obtida pelo número de folhas contidas na amostra. O volume do material foi obtido conforme descrito anteriormente. Os ensaios para determinação de ρ_p das folhas de manjerição foram realizados em triplicata e o valor médio foi considerado.

A área superficial (A_p) das folhas foi obtida através da Equação (49), onde a área total foi estimada a partir da área projetada (A_{proj}), obtida pela técnica de análise de imagens, e da área lateral, obtida pelo produto entre o perímetro (P) e a espessura média (δ) da folha:

$$A_p = 2xA_{proj} + Px\delta \quad (49)$$

A esfericidade (ϕ) das folhas foi determinada pela relação entre a média geométrica dos três eixos perpendiculares ao corpo e o maior eixo do material (MOHSENIN, 1970), conforme a Equação (40).

O teor de umidade das folhas *in-natura* foi determinado pelo método da estufa a $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$ por 24 horas (AOAC, 1990). Amostras de 3,0 g de folhas foram acondicionadas em placas de Petri e submetidas à estufa de secagem e esterilização Fanem (modelo 320-SE). O teor de umidade em base úmida (M (b.u.) em %) foi, então, obtido pelo uso da equação:

$$M \text{ (b.u.)} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_i} \times 100 \quad (50)$$

onde $m_{\text{H}_2\text{O}}$ é a massa de água que corresponde à diferença entre a massa inicial da amostra de folhas (m_i) e a massa da amostra seca.

O óleo essencial das folhas de manjeriço *in-natura* foi obtido por hidrodestilação em destilador de óleos essenciais tipo Clevenger (Marconi, MA 553). O balão de fundo redondo (2000 mL) foi carregado com aproximadamente 80,0 g de folhas e 1000 mL de água destilada e o tempo de extração foi de 3 horas contadas a partir da ebulição (BASSOLÉ et al., 2010; CAROVIĆ-STANKO et al., 2010).

A massa de óleo essencial extraída foi medida em balança digital AND FR200 (precisão de $1,0 \times 10^{-4}$ g) e utilizada para calcular o rendimento do processo de extração:

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{\text{massa de óleo essencial extraído (g)}}{\text{massa inicial do material vegetal (g)}} \times 100 \quad (51)$$

O óleo foi, então, armazenado em frasco de vidro, tampado, vedado com parafilme, envolto em papel alumínio e mantido sob refrigeração ($T \cong 4,0^\circ\text{C}$) até análise.

O óleo essencial extraído das folhas foi analisado através da técnica de cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-EM), que permite a separação e identificação de quase todos os compostos a nível de microgramas (COLLINS; BRAGA; BONATO, 1997).

O equipamento utilizado foi um CG-EM Shimadzu (modelo QP 5000) operando no modo de impacto eletrônico (70 eV) e com coluna capilar DB-5 (30 m de comprimento x 0,25 mm de diâmetro interno x 0,25 μm de espessura do filme da fase estacionária). O hélio foi utilizado como gás de arraste a uma pressão de 100 kPa e velocidade de 46,4 cm/s. A programação de temperatura para o forno foi: temperatura inicial de 60°C mantida por 3 minutos; $5^\circ\text{C}/\text{min}$ até 200°C , sendo esta temperatura também mantida por 3 minutos; $15^\circ\text{C}/\text{min}$ até 280°C . A temperatura final de 280°C foi mantida por 1 minuto. As temperaturas do injetor e da interface do detector foram de 260°C e 280°C , respectivamente.

As amostras analisadas foram preparadas diluindo-se 20 μL de óleo essencial em 300 μL de hexano e o volume de amostra injetado foi de 1,0 μL com razão de split 1:30.

A análise quantitativa das substâncias foi realizada através da integração eletrônica dos picos que aparecem no cromatograma, cujas áreas são proporcionais à massa de cada composto presente no óleo. A identificação destes compostos químicos foi feita mediante comparação entre os espectros de massas obtidos para cada composto e os espectros de massas da biblioteca espectral Wiley do aparelho.

O Índice de retenção de Kovats (IK), que descreve o comportamento cromatográfico de um composto de interesse (CI) comparativamente ao de uma mistura padrão de alcanos lineares, foi utilizado como dado complementar para se confirmar a identidade dos constituintes. Para a determinação dos IK dos compostos presentes no óleo foi injetada uma mistura padrão de alcanos lineares (C9-C20) nas mesmas condições da amostra de óleo. O IK de cada composto foi, então, calculado pelo uso da Equação (52) e, em seguida, comparado com os índices de Kovats de compostos descritos na literatura (ADAMS, 1995).

$$IK = 100Z + \left\{ 100 \frac{[\log t'r(CI) - \log t'r(Z)]}{\log t'r(Y) - \log t'r(Z)} \right\} \quad (52)$$

onde: Z = número de átomos de carbono do hidrocarboneto linear que elui antes do composto de interesse (CI);

$t'r(CI)$ = tempo de retenção ajustado do composto CI;

$t'r(Z)$ = tempo de retenção ajustado do hidrocarboneto Z, e

$t'r(Y)$ = tempo de retenção ajustado do hidrocarboneto que elui depois do CI.

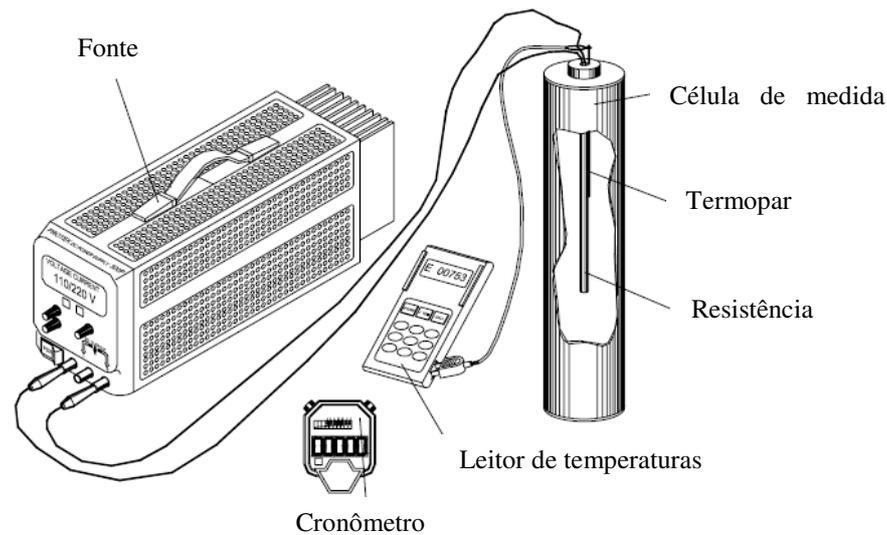
As propriedades térmicas foram determinadas utilizando folhas desidratadas e em pó. Folhas inteiras foram colocadas em estufa de secagem e esterilização Fanem (modelo 320-SE) na temperatura de 45°C por 22 horas e, em seguida, manualmente pulverizadas. A análise granulométrica do pó obtido foi realizada utilizando uma peneiradora vibratória Retsch AS200 control e o diâmetro médio de peneira (D_s) foi calculado através da equação:

$$D_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{D_i}} \quad (53)$$

onde x_i é a fração mássica do pó retido na peneira i e D_i é o diâmetro médio de abertura de duas peneiras consecutivas.

A condutividade térmica efetiva foi obtida com base no método da sonda linear em regime transiente utilizando-se o aparato experimental esquematizado na Figura 3.2, que se encontra disponível no Centro de Secagem de Pastas e Sementes do DEQ/UFSCar. O equipamento consiste de uma célula de medida cilíndrica, confeccionada em PVC, com 30,08 cm de diâmetro interno e 28,0 cm de altura. Na ‘tampa’ deste cilindro estão afixados um termopar de *chromel-alumel*, conectado a um leitor de temperaturas Digi-Sense[®] da Cole Parmer (modelo 91100-00), e uma sonda cuja resistência interna encontra-se ligada a uma fonte DC da marca Protek (modelo 3003B). O resistor elétrico utilizado apresenta $6,4 \times 10^{-3}$ m de diâmetro e 0,265 m de comprimento. Suas especificações são: potência nominal de 600 W para uma tensão elétrica de 220 V.

Figura 3.2 – Esquema do aparato experimental utilizado na determinação da condutividade térmica efetiva.



Fonte: Ferreira (2003).

Para a realização dos experimentos, pequenas porções das folhas secas e pulverizadas de manjericão foram inseridas na célula, que foi batida manualmente depois de cada adição para a acomodação do material. Este procedimento foi repetido até a inserção de todo o material ($m \cong 127,0$ g) e, após o fechamento da célula, o experimento foi iniciado ao se aplicar uma corrente elétrica contínua de intensidade 0,11 A ao resistor.

Os valores de temperatura em função do tempo foram utilizados para a construção das curvas de T em função de $\ln(t)$. Como o modelo resultante do truncamento da Equação (47), que se encontra no item 2.4.5, para a determinação da condutividade térmica efetiva é válido para tempos longos, foi necessário determinar a região linear destas curvas.

Para isso, utilizou-se uma rotina do software Matlab® desenvolvida por Vieira (2012) e programada para descartar pontos experimentais de tempos iniciais até que o coeficiente de determinação (R^2) fosse maior ou igual a 0,99. Obteve-se, então, o coeficiente angular da porção linear da curva de temperatura em função do logaritmo natural do tempo ($q/4\pi k_{ef}$) e, conhecendo-se a potência dissipada por unidade de comprimento (q) calculou-se o k_{ef} do material de acordo com a equação:

$$\frac{d\Delta T}{d \ln t} = \frac{q}{4\pi k_{ef}} \quad (48)$$

Dois ensaios foram realizados para a determinação da condutividade térmica efetiva das folhas e o valor médio foi utilizado.

O calor específico do material foi determinado através da técnica de calorimetria de varredura diferencial utilizando o equipamento DSC Q2000 da TA *Instruments*, disponível no Laboratório de Análise Térmica, Eletroanalítica e Química do IQ/USP. A faixa de temperatura utilizada nos ensaios foi de 34°C a 63°C com taxa de aquecimento de 10°C por minuto.

As folhas de manjeriço cortadas em diferentes tamanhos (Figura 3.1) foram também caracterizadas quanto às dimensões características e área superficial, conforme metodologias acima descritas.

3.1.2 Densidades *bulk* aerada e consolidada

Com o intuito de obter uma estimativa de como a densidade *bulk* varia com o tamanho e a umidade das folhas, foram realizados ensaios para folhas com diferentes tamanhos (folhas inteiras, cortadas em duas e em quatro partes) e utilizando folhas com diferentes teores de umidade (*in-natura*, totalmente seca e com dois teores de umidade intermediários). Para os ensaios com as folhas *in-natura* foi utilizada uma massa de folhas de aproximadamente 100,00 g. Para os demais, uma massa em torno de 130,00 g de folhas *in-natura* foi colocada em uma estufa de secagem e esterilização FANEM (modelo 320-SE) com temperatura de 45°C por tempos iguais a 2 horas e 30 minutos, 5 horas e 22 horas. Este procedimento forneceu amostras com teores de umidade, respectivamente, iguais a (78,8±1,9)%, (67,9±5,4)% e (9,6±1,9) % (b.u.).

A densidade *bulk* aerada dos leitos foi determinada manualmente inserindo-se a massa de folhas em uma proveta com volume total de 2000 mL (8,0 cm de diâmetro e 46,5 cm de altura). O volume ocupado pelo leito de folhas (V_b) foi medido e a densidade *bulk* calculada mediante o uso da Equação (43).

A densidade *bulk* compactada foi obtida de maneira semelhante à anterior. Entretanto, o volume medido era o ocupado pela massa de partículas após compactação efetuada com o auxílio do dispositivo de madeira mostrado na Figura 3.3. A compactação era obtida elevando-se a proveta até a altura da placa horizontal e deixando-a cair em seguida, em sucessivas batidas. A presença da placa de madeira localizada a aproximadamente 8,0 cm da base do dispositivo impedia que a proveta fosse erguida em diferentes alturas, garantindo, assim, a padronização da altura de elevação e de queda da proveta.

Figura 3.3 – Fotografias do dispositivo de madeira utilizado para a compactação padronizada das folhas.



Fonte: Acervo pessoal.

Para avaliar a compactação dos materiais foram determinados os valores de densidade *bulk* compactada em função do número de batidas, que variou até que as densidades *bulk* compactadas atingissem valores constantes. Todas as medidas foram realizadas em triplicata e usando-se o mesmo padrão de inserção do material no interior da proveta e posterior compactação.

3.1.3 Umidade de equilíbrio

As umidades de equilíbrio das folhas de *O. basilicum* foram determinadas pelo método gravimétrico estático, utilizando soluções salinas saturadas em água destilada com

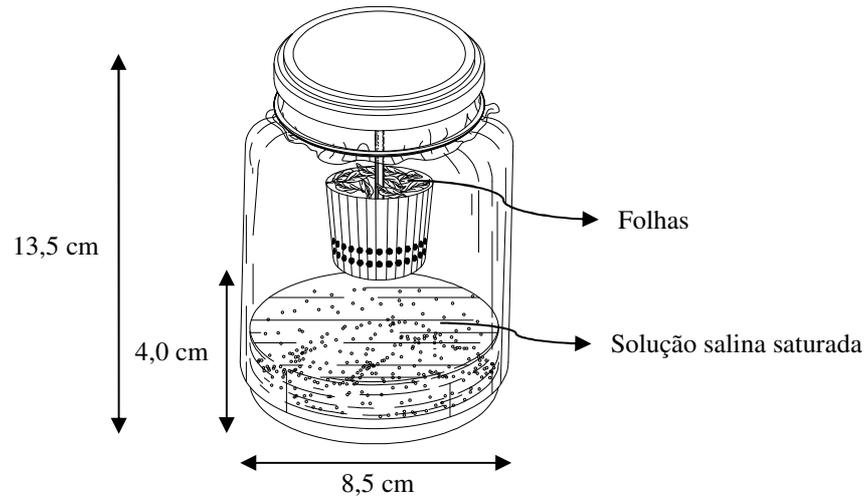
umidades relativas variando de 0,110 a 0,836 (ver Tabela 3.1). As umidades relativas das soluções nas diferentes temperaturas foram obtidas de Greenspan (1977).

Tabela 3.1 – Valores de umidade relativa relacionados às soluções salinas saturadas nas temperaturas de 30, 45 e 60°C.

Sal	Umidade Relativa do Ar (decimal)		
	T=30°C	T=45°C	T=60°C
LiCl	0,113	0,112	0,110
CH ₃ COOK	0,216	0,195 ^c	0,160 ^c
MgCl ₂ .6H ₂ O	0,324	0,311	0,293
K ₂ CO ₃	0,432	0,423 ^a	0,392 ^a
Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	0,514	0,469	0,440 ^c
NaNO ₂	0,635 ^b	0,603 ^b	0,585
NaCl	0,751	0,745	0,745
KCl	0,836	0,817	0,803

Fontes: Greenspan (1977); ^aBilali et al. (2000); ^bLabuzza, Kaanane e Chen (1985); ^cMaroulis et al. (1988).

Para os ensaios de dessorção de umidade, realizados em triplicata, foram utilizadas amostras de aproximadamente 3,0 g de folhas *in-natura* cortadas ao meio. As diferentes soluções salinas foram preparadas em potes de vidro cilíndricos de 8,5 cm de diâmetro e 13,5 cm de altura e as folhas foram acondicionadas em recipientes plásticos perfurados localizados a 4,0 cm da base dos potes com o intuito de evitar qualquer contato entre a fase líquida e as folhas. Para dar início ao processo de sorção de umidade, os potes foram hermeticamente fechados e colocados em estufa de secagem e esterilização Fanem (modelo 315-SE) com temperaturas controladas de 30, 45 e 60°C – temperaturas utilizadas neste trabalho para a secagem das folhas. Para garantir a obtenção do equilíbrio, os potes foram mantidos sob condições termodinâmicas constantes durante 30 dias (CORDEIRO; RAGHAVAN; OLIVEIRA, 2006; ZANOELO, 2005). Após esse período, os recipientes plásticos contendo as amostras foram pesados a cada dois dias visando acompanhar a perda de massa. O equilíbrio higroscópico foi considerado alcançado quando a variação de massa das amostras, entre três pesagens sucessivas, foi igual ou inferior a 0,001 g. O conteúdo de umidade de equilíbrio foi, então, determinado pelo método da estufa a (105 ± 3)°C por 24 horas (AOAC, 1990). Um esquema dos potes herméticos utilizados para obtenção das isotermas de dessorção é mostrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Esquema geral do dispositivo utilizado na obtenção das isotermas de equilíbrio.

Fonte: Acervo pessoal.

Aos dados experimentais de umidade de equilíbrio obtidos para as folhas de *O. basilicum* foram ajustadas cinco equações semi-empíricas com aplicação reconhecida na predição de umidade de equilíbrio de vários produtos agrícolas. Dentre as equações apresentadas na Tabela 2.2, foram utilizadas as de Oswin modificado (Equação (20)), Chung-Pfost (Equação (23)), Henderson-Thompson (Equação (25)), Halsey modificado (Equação (26)) e Sigma-Copace (Equação (28)).

A determinação dos parâmetros de ajuste dos modelos aos pontos experimentais foi efetuada por meio da rotina Solver do programa Microsoft Excel, utilizando a técnica dos mínimos quadrados. O coeficiente de determinação (R^2), assim como a soma dos quadrados dos resíduos (SQR) e o erro relativo médio (ERM), calculados através das Equações (54) e (55), respectivamente, foram utilizados para averiguar a adequação dos modelos investigados.

$$SQR = \sum_{i=1}^N (y_{i,\text{exp}} - y_{i,\text{mod}})^2 \quad (54)$$

$$ERM = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_{i,\text{exp}} - y_{i,\text{mod}}}{y_{i,\text{exp}}} \right| \quad (55)$$

onde $y_{i,\text{exp}}$ e $y_{i,\text{mod}}$ são os valores obtidos experimentalmente e os valores preditos pelo modelo, respectivamente, e N é o número de observações realizadas.

Valores de R^2 próximos de 1 e valores de SQR e ERM abaixo de 10%, associados com uma distribuição de resíduos aleatória indicam bom ajuste do modelo aos dados experimentais (AKPINAR, 2006).

3.2 Equipamentos

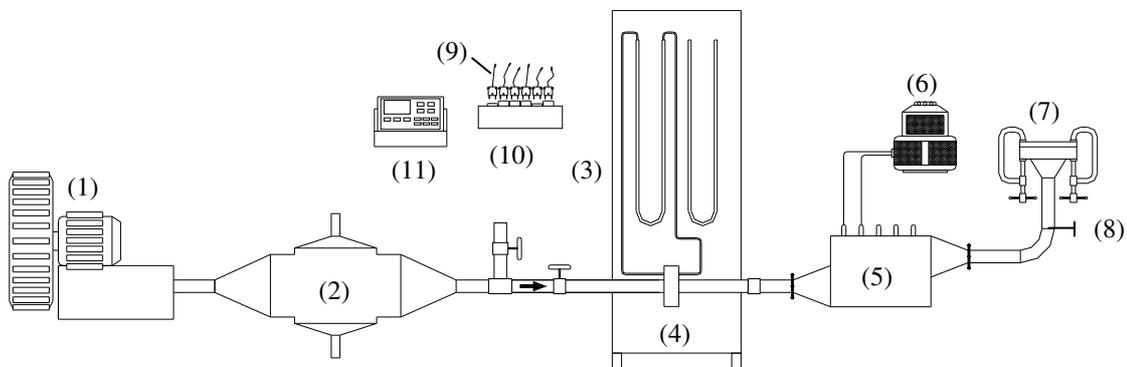
3.2.1 Unidade experimental 1

Uma linha de fornecimento de ar devidamente instrumentada e dotada de sistemas de aquecimento e resfriamento foi utilizada nos ensaios envolvendo escoamento cruzado através dos leitos constituídos por folhas. Esta linha multiuso é mostrada na Figura 3.5, e foi utilizada no presente trabalho em experimentos diversos, variando-se somente a célula acoplada na extremidade do duto ao fim da linha, de acordo com o objetivo pretendido.

Nesta linha, o ar era fornecido por um soprador (1) de 0,75 HP e a vazão de ar alimentada era regulada utilizando-se duas válvulas tipo gaveta instaladas na saída do soprador. A vazão alimentada era medida através da leitura da diferença de pressão em um manômetro de água tipo U (3), conectado a um medidor de vazão do tipo dupla placa de orifício (4) previamente calibrado.

Figura 3.5 – Linha de fornecimento de ar utilizada na secagem em leito fixo com escoamento de ar cruzado à amostra.

- | | | |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| (1) Soprador de ar | (5) Aquecedor | (8) Válvula |
| (2) Resfriador | (6) Variador de voltagem | (9) Termopar |
| (3) Manômetro | (7) Local de acoplamento da | (10) Chave seletora |
| (4) Placa de orifício | célula de secagem | (11) Leitor de temperaturas |



Fonte: Acervo pessoal.

O ar de secagem era aquecido em um aquecedor elétrico (5) de 2500 W, ligado a um variador de voltagem (6), escoando, em seguida, através de uma tubulação metálica de

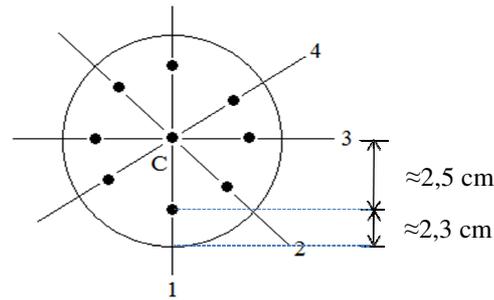
5,0 cm de diâmetro. Ao final desta tubulação foi inserida uma expansão cônica metálica com o objetivo de aumentar o diâmetro da tubulação de 5,0 para 10,0 cm. Para uniformizar o escoamento de ar que chega à célula, inseriu-se, após a expansão metálica, um sistema distribuidor constituído por um leito fixo de 3,0 cm de espessura de esferas de vidro ($d_p=2,8$ cm), preso entre duas telas metálicas. A célula adequada ao tipo de ensaio a ser efetuado era, então, acoplada na extremidade do duto (7).

A umidade relativa do ar de secagem foi medida com o uso de um termohigrômetro da Cole-Parmer, modelo 37950-00 (precisão de $\pm 3\%$). Uma válvula (8) existente na linha foi aberta, direcionando parte do fluxo de ar para uma estreita tubulação, onde o termohigrômetro era posicionado. Para as medidas de temperatura no leito foram utilizados termopares de cobre-constantan (9) conectados a uma chave seletora de termopares (10), que era ligado a um leitor de temperaturas (11) Digi-Sense da Cole-Parmer (modelo 91090-00).

3.2.1.1 Ensaios preliminares

(a) Verificação da uniformidade do escoamento do ar

Com o intuito de verificar a qualidade do sistema distribuidor de ar da unidade experimental 1, perfis de velocidade foram medidos no leito à aproximadamente 2,0 cm acima da placa distribuidora utilizando um anemômetro Tri-Sense® Kit, modelo 37000-95 da marca Cole-Parmer (precisão de $\pm 3\%$ do valor lido $\pm 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), para uma velocidade média do ar de entrada fixa e igual a $1,50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Como mostra o esquema da Figura 3.6, a velocidade do ar de secagem foi medida em oito pontos de amostragem, distanciados da parede da célula em aproximadamente 2,3 cm, e no ponto central (C). Os ensaios foram realizados em duplicata e o valor médio de U obtido em cada ponto foi utilizado.

Figura 3.6 – Esquema da distribuição dos pontos de amostragem no leito cilíndrico.

Fonte: Acervo pessoal.

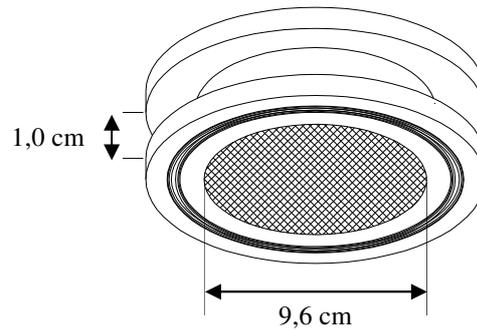
(b) Calibração dos termopares

Os termopares utilizados nos ensaios feitos para determinação dos perfis de temperatura foram previamente calibrados. Para isto, selecionou-se 11 termopares tipo T, que foram ligados a um leitor de temperaturas Digi-Sense da Cole-Parmer, modelo 91090-00. A calibração foi realizada utilizando-se um calibrador de termopares Techne (modelo DB-35L), com precisão de $0,1^{\circ}\text{C}$, e os termopares foram submetidos às temperaturas de $10,0$; $30,0$; $50,0$; $70,0$ e $90,0^{\circ}\text{C}$. A temperatura do calibrador era inicialmente ajustada, o termopar era então inserido no calibrador e sua temperatura averiguada até que não fosse verificada mais nenhuma variação.

Os valores de temperatura lidos em cada termopar foram inseridos em gráficos como função das temperaturas de referência ajustadas no calibrador. Para a seleção dos termopares, fez-se a regressão linear dos dados e foram escolhidos os seis termopares que apresentaram melhor ajuste (coeficiente de determinação próximo à unidade).

3.2.1.2 Secagem em leito fixo e camada delgada

A Figura 3.7 mostra um desenho da célula de secagem construída para os experimentos de secagem em camada fina. Esta célula apresenta geometria cilíndrica com $9,6 \times 10^{-2}$ m de diâmetro e $1,0 \times 10^{-2}$ m de altura, e possui telas metálicas nas duas bases. Em ensaios preliminares verificou-se que a temperatura do ar de secagem se manteve constante ao longo de um leito de folhas de 1,0 cm de espessura, caracterizando a ausência de gradientes significativos de temperatura.

Figura 3.7 – Célula utilizada nos ensaios de secagem em camada fina.

Fonte: Acervo pessoal.

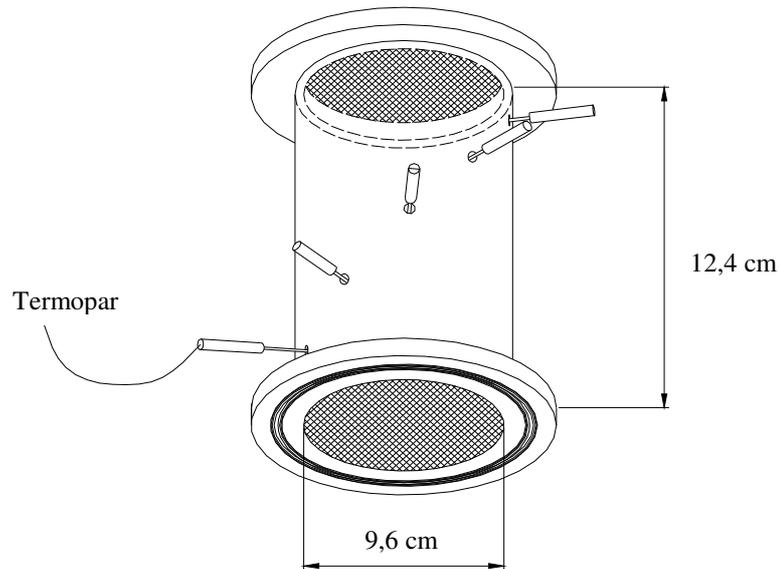
3.2.1.3 Secagem em leito fixo e camada espessa

Os ensaios de secagem em leito fixo e utilizando uma camada espessa de material tiveram como objetivo a obtenção experimental de distribuições de temperatura e umidade no leito. Nestes ensaios foram utilizadas células feitas de acrílico com telas metálicas nas extremidades e cerca de 12,0 cm de altura, mantendo-se o mesmo diâmetro da célula utilizada na secagem em camada fina ($9,6 \times 10^{-2}$ m).

(a) Determinação da distribuição de temperatura no leito

Na Figura 3.8 é apresentado um desenho da célula usada para as medidas de temperatura ao longo do leito. Seis termopares de cobre-constantan foram utilizados para as medidas de temperatura, sendo um deles posicionado na base da célula (sem contato com o material no leito) e os outros cinco inseridos ao longo da parede da célula (distanciando-se de 1,00; 4,80; 7,10; 9,40 e 11,30 cm da base). Os cinco termopares inseridos na célula foram ligados a uma chave seletora. Esta chave, assim como o termopar inserido na base do leito, foram conectados ao leitor de temperaturas Digi-Sense da Cole-Parmer (modelo 91090-00).

Figura 3.8 – Célula usada na obtenção da distribuição de temperatura no leito.

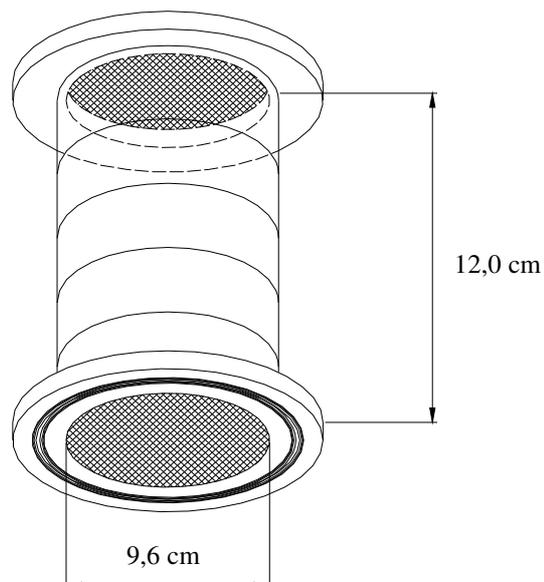


Fonte: Acervo pessoal.

(b) Determinação da distribuição de umidade no leito

Para a determinação da distribuição de umidade nos leitos de folhas foi construída a célula mostrada na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Célula usada na obtenção da distribuição de umidade no leito.



Fonte: Acervo pessoal.

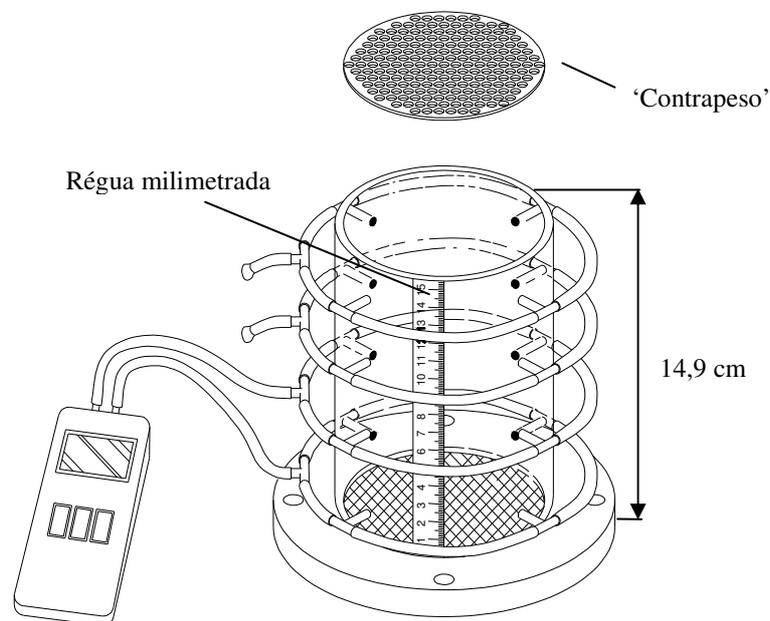
Esta célula foi dividida em cinco seções com altura igual a $2,4 \times 10^{-2}$ m, dotadas em suas extremidades de um sistema de encaixe e vedação que possibilitava a sobreposição das

diversas secções. Este arranjo permitia a fragmentação do leito ao final de cada ensaio e a determinação de teores de umidade em cada secção, obtendo-se, desta forma, um perfil axial de umidade no leito.

3.2.1.4 Secagem com encolhimento ‘controlado’

A célula utilizada nos experimentos de secagem com encolhimento ‘controlado’ do leito de folhas é mostrada na Figura 3.10. Esta célula possui o mesmo diâmetro das anteriores e $14,9 \times 10^{-2}$ m de altura, com uma tela metálica na base inferior. Uma placa de acrílico perfurada ($m=6,15$ g) é usada como ‘contrapeso’ na parte superior da célula com o objetivo de evitar o encolhimento lateral do leito de folhas. Tomadas de pressão com montagem em anel distanciadas de 1,5; 5,5; 9,5 e 13,5 cm da base permitem a medição da pressão média nas diferentes camadas do leito. Um micromanômetro Alnor[®], modelo AXD 530 (precisão igual a $\pm 1\%$ do valor indicado + 0,01 in H₂O) é utilizado para as medidas de queda de pressão através do leito.

Figura 3.10 – Célula usada nas medidas de encolhimento ‘controlado’.



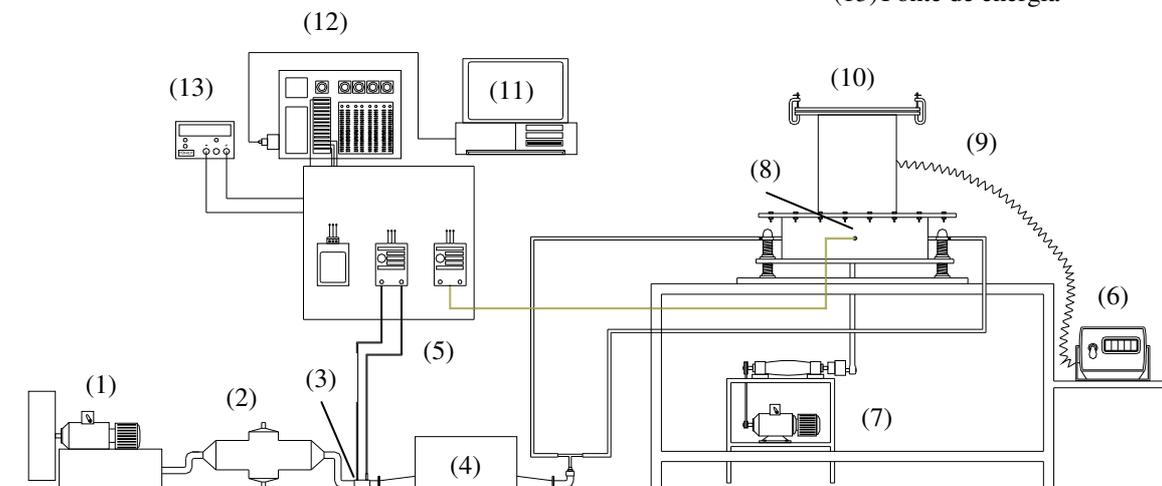
Fonte: Acervo pessoal.

3.2.2 Unidade experimental 2

Para a realização dos ensaios de secagem em leitos móveis foi utilizada a linha mostrada na Figura 3.11. O ar era provido por um soprador (1) da marca IBRAM de 7,5 CV, uma válvula gaveta instalada na linha permitia o ajuste da vazão de ar e uma válvula de desvio era utilizada para auxiliar neste ajuste. A vazão era medida através de uma placa de orifício (3) previamente calibrada. A queda de pressão na placa de orifício era medida por um transdutor de pressão (5) (Auto Tran Incorporated, 0 a 5 psi) ligado a um sistema de aquisição de dados (microcomputador (11) com placa de aquisição A/D PCI-6024E da National Instruments (12)). A queda de pressão na base do leito (8), logo abaixo do sistema distribuidor de ar, era medida com um transdutor (5) que opera na faixa de 0 a 10 in H₂O e, neste caso, obteve-se uma equação que representa a queda de pressão provocada pelo sistema distribuidor. Esta equação foi utilizada para descontar a contribuição da queda de pressão gerada pelo sistema distribuidor de ar daquela provocada pelo material no leito. Cada ponto de vazão do ar e queda de pressão no leito fornecido pelo sistema de aquisição de dados foi obtido pela média aritmética de 512 pontos coletados a uma frequência de aproximadamente 170 Hz.

Figura 3.11 – Linha de fornecimento de ar utilizada na secagem em leito fluidizado.

- | | | |
|-----------------------|--------------------------------|---|
| (1) Soprador de ar | (5) Transdutores de pressão | (9) Termopar |
| (2) Resfriador | (6) Controlador de temperatura | (10) Câmara de secagem |
| (3) Placa de orifício | (7) Motor | (11) Microcomputador |
| (4) Aquecedor | (8) Tomada de pressão | (12) Placa de aquisição A/D
PCI6024E |
| | | (13) Fonte de energia |



Fonte: Acervo pessoal.

A temperatura média do ar injetado no sistema foi medida por um termopar tipo T (9) inserido na base do leito. Durante os ensaios fluidodinâmicos, a temperatura do ar foi mantida em $(25\pm 5)^{\circ}\text{C}$ com o auxílio de um refrigerador a água (2). Um aquecedor a resistências elétricas (4), ligado a um controlador de temperaturas Flyever FE50RP (6), foi utilizado para o aquecimento do ar nos experimentos de secagem.

A fim de homogeneizar o escoamento de ar fornecido para a câmara de secagem, este era injetado em contracorrente utilizando duas entradas no *plenum* através de uma bifurcação em ‘T’. Em seguida, o ar escoava através de um sistema distribuidor composto por um leito fixo de 3,0 cm de esferas de vidro ($d_p=2,18$ mm) retido entre duas placas de $2,0\times 10^{-3}$ m de espessura com furos de $0,8\times 10^{-3}$ m de diâmetro, resultando em uma área aberta de aproximadamente 10% da placa.

Para os ensaios de secagem foi utilizada uma câmara retangular de acrílico (10), com altura de 0,27 m, e secção de área transversal de 0,20 m x 0,11 m, que permitia a visualização do comportamento das folhas em seu interior. Não foi observada, nas condições investigadas, a presença de efeitos eletrostáticos durante os ensaios. Uma tela foi adaptada no topo do leito para evitar a elutriação do material. O ar proveniente da linha descrita era alimentado na câmara de secagem e o sistema podia ser operado com ou sem vibração mecânica. Quando necessário, as vibrações eram impostas ao leito através de uma haste ligada a um mecanismo excêntrico, que convertia o movimento rotacional produzido por um motor WEG de 0,5 HP (7) para movimento vertical senoidal no leito. O ajuste da amplitude de vibração foi realizado no próprio excêntrico e um variador de velocidade Ringcogne RXM-750 localizado no eixo do motor elétrico permitiu o ajuste da frequência de vibração, que foi medida com o uso de um tacômetro óptico Minipa MDT-2244.

3.2.2.1 Ensaios preliminares

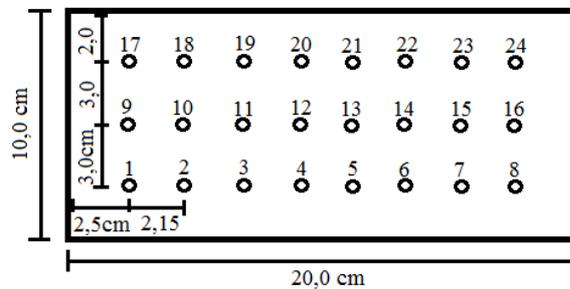
(a) Verificação da uniformidade do escoamento do ar

Como esquematizado na Figura 3.12, o leito foi dividido em vinte e quatro pontos de amostragem, três ao longo da largura contra oito ao longo do comprimento, sendo estes pontos distanciados de 2,0 cm da base e de, pelo menos, 2,0 cm das paredes da câmara do leito. Para uma velocidade média do ar de entrada constante ($\bar{U}=1,01$ m.s⁻¹), mediu-se o valor da velocidade do ar em cada ponto de amostragem.

Três furos de diâmetro igual a 0,01 m existentes em cada lateral da câmara permitiram que a sonda de um anemômetro Tri-Sense[®] Kit da Cole-Parmer, modelo 37000-95 (precisão de $\pm 3\%$ do valor indicado $\pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$) fosse introduzida ao longo da câmara até atingir a metade de seu comprimento, minimizando a interferência da sonda nas medidas.

Os ensaios foram realizados em duplicata e o valor médio de U obtido em cada ponto foi utilizado. Terminada a amostragem, construiu-se o gráfico de superfície de resposta do adimensional de velocidade (U/\bar{U} do ar de entrada no leito= $1,01 \text{ m.s}^{-1}$) em função do comprimento e da largura da célula.

Figura 3.12 – Esquema da distribuição dos pontos de amostragem no leito retangular.



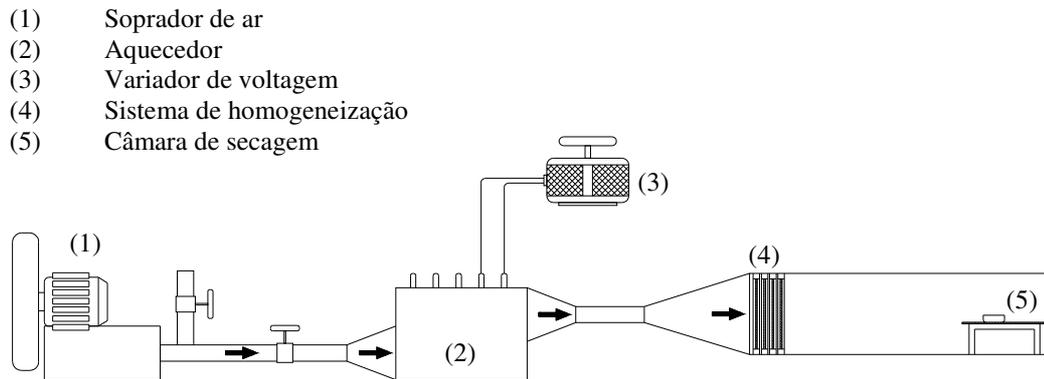
Fonte: Acervo pessoal.

3.2.3 Unidade experimental 3

Os ensaios de secagem com escoamento de ar paralelo ao material foram realizados no secador convectivo horizontal mostrado na Figura 3.13. Nesta linha, o ar era fornecido por um soprador (1) da marca IBRAM de 4,0 CV. Uma válvula gaveta era usada para ajuste da vazão de ar. Em seguida, o ar era aquecido em um aquecedor elétrico (2) de 2500 W, ligado a um variador de voltagem (3), e escoava através de uma tubulação de ferro galvanizado de 4" de diâmetro até uma expansão metálica localizada na entrada do compartimento de secagem. Este compartimento era composto por duas partes: o sistema de homogeneização do ar (4) e a câmara de secagem (5).

Para uniformizar o escoamento de ar, após a tubulação e expansão metálica, existe um sistema de homogeneização formado por placas perfuradas. Os furos das placas não se encontram alinhados com o intuito de evitar a formação de canais preferenciais de escoamento e, assim, melhorar a uniformidade do escoamento. O compartimento de secagem possui 1,15 m de comprimento e secção de área transversal de 0,40 m x 0,20 m, e a secção onde é inserida a amostra tem dimensões iguais a 0,50 m x 0,20 m x 0,20 m.

Figura 3.13 – Linha de fornecimento de ar utilizada na secagem com escoamento de ar paralelo à amostra.



Fonte: Acervo pessoal.

A velocidade do ar foi medida no centro da câmara de secagem através de perfurações presentes na lateral do equipamento e utilizando um anemômetro Tri-Sense® Kit, da Cole-Parmer, modelo 37000-95 (precisão de $\pm 3\%$ do valor indicado $\pm 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). O posicionamento do anemômetro para a medida de velocidade foi escolhido após testes para verificar a homogeneidade da velocidade do ar na câmara de secagem. Uma perfuração no topo da câmara foi utilizada para as medidas de temperatura e umidade relativa do ar de secagem através do uso de um termohigrômetro da Cole-Parmer, modelo 37950-00 (precisão $R_h = \pm 3\%$ e $T = \pm 0,5^\circ\text{C}$).

Para a realização dos ensaios de secagem, uma célula construída de tela metálica foi utilizada. Esta célula possui geometria retangular com $2,00 \times 10^{-1} \text{ m}$ de comprimento, $1,00 \times 10^{-1} \text{ m}$ de largura e altura igual a $1,35 \times 10^{-2} \text{ m}$.

3.3 Procedimento experimental

3.3.1 Empacotamento do material e condições experimentais de secagem

Após a seleção e caracterização do material (ver item 3.1), as folhas foram inseridas nas diferentes células de secagem para o início dos experimentos. O método utilizado para a inserção do material nos leitos consistiu no derramamento de pequenas porções de folhas (2,0 a 3,0 g), em etapas, de tal forma que todas viessem a sofrer a mesma altura de queda. Após cada adição, batidas na célula eram realizadas para a acomodação das folhas, sendo este procedimento repetido até a inserção de todo o material.

A Tabela 3.2 mostra as condições de secagem utilizadas nos experimentos realizados neste trabalho. Temperaturas iguais a 30, 45 e 60°C foram aqui avaliadas para a secagem das folhas de manjeriço e foram escolhidas por serem temperaturas usualmente utilizadas para a secagem de plantas. Como o uso de velocidades superiores à aproximadamente 0,50 m.s⁻¹ desestruturou os leitos fixos de folhas, a velocidade do ar foi mantida constante e igual a 0,40 m.s⁻¹ nos ensaios utilizando leitos fixos com escoamento de ar perpendicular à amostra assegurando, assim, que as folhas não fossem arrastadas pelo fluxo. No entanto, para os experimentos de secagem com escoamento de ar paralelo à amostra e nos ensaios em leito ‘expandido’ utilizando diferentes condições do adimensional de vibração (Γ), uma velocidade superficial igual a 1,0 m.s⁻¹ foi empregada. Para estes últimos, a velocidade do ar foi, inicialmente, aumentada lentamente até o valor máximo inferior ao de elutriação das partículas sendo, em seguida, reduzida até o valor de 1,0 m.s⁻¹.

Como pode ser visto na Tabela 3.2, somente para os ensaios em camada fina com escoamento cruzado foram avaliadas todas as condições de temperatura e comprimento das folhas, o que se deu em função deste tipo de estudo ser o mais amplamente investigado na literatura. Para os experimentos de secagem em leitos espessos, somente condições extremas de temperatura e tamanho das folhas foi investigado, e para a secagem em leitos expandidos optou-se pelo uso da temperatura média.

Tabela 3.2 – Condições experimentais utilizadas nos experimentos de secagem.

Experimento		T (°C)	Folhas
Secagem em camada fina	Escoamento cruzado ao leito	30, 45 e 60	Inteiras, em duas e 4 partes
	Escoamento paralelo ao leito	60	Inteiras
Secagem em leitos espessos	Distribuição de temperatura e umidade	30 e 60	Inteiras e em 4 partes
	Encolhimento ‘controlado’	30 e 60	Inteiras
Secagem em leito ‘fluidizado’	Com e sem vibração	45	Inteiras

Fonte: Acervo pessoal.

Nos ensaios onde a determinação do teor de umidade final das amostras foi necessária, utilizou-se o método da estufa a (105 ± 3)°C por 24 horas (AOAC, 1990).

3.3.2 Cinética de secagem em leito fixo e camada fina

Experimentos de secagem em camada fina foram realizados para duas configurações de escoamento do ar: cruzada e paralela ao ‘pacote’ de folhas. Para a realização de ambos os experimentos, as células de secagem foram preenchidas com folhas de manjeriço *in-natura*, totalizando uma massa de aproximadamente 12,0 g e, em seguida, foram acopladas/inseridas nas unidades experimentais 1 (Figura 3.5) e 3 (Figura 3.13) para a secagem com escoamentos cruzado e paralelo, respectivamente. Em intervalos de tempo de 10 minutos, as células eram retiradas e suas massas determinadas em balança com precisão de 0,01 g (Marte, modelo AS 1000) até atingir massa constante. O teor de umidade final das amostras foi, então, determinado e os dados obtidos em cada experimento foram utilizados para a construção das curvas de secagem da umidade adimensional, $MR = (\bar{M} - M_e) / (M_i - M_e)$, em função do tempo. Os adimensionais de umidade foram determinados utilizando os valores de umidade de equilíbrio calculados pela equação de Halsey modificada.

Os ensaios de cinética de secagem em camada fina com escoamento de ar cruzado ao leito foram realizados em triplicata, enquanto o ensaio com escoamento de ar paralelo ao leito foi realizado com apenas uma réplica.

Os modelos matemáticos de Lewis, Page, Henderson e Pabis, Logarítmico e de Midilli e Kucuk mostrados na Tabela 2.1 foram ajustados aos dados experimentais por meio da técnica dos mínimos quadrados utilizando a rotina Solver do Microsoft Excel[®]. O coeficiente de determinação (R^2), a soma dos quadrados dos resíduos (SQR), o erro relativo médio (ERM) e os gráficos de distribuição dos resíduos (DRes) foram utilizados para averiguar a qualidade dos ajustes.

3.3.3 Secagem em leito fixo e camada espessa

3.3.3.1 Determinação da distribuição de temperatura no leito

Nos ensaios para determinação da distribuição de temperatura no leito, a célula de secagem (ver Figura 3.8) com as folhas *in-natura* ($m \cong 125,0$ g; $\rho_b \cong 0,139$ g.cm⁻³) foi acoplada à extremidade do duto da unidade experimental 1 (Figura 3.5), os termopares inseridos e as temperaturas ao longo da célula de secagem medidas em intervalos de tempo de 10 minutos. Os resultados de temperatura e tempo obtidos para cada experimento foram

utilizados para a construção dos gráficos de T ($^{\circ}\text{C}$) em função de t (min) e, em seguida, analisados.

3.3.3.2 Determinação da distribuição de umidade no leito

Para a determinação da distribuição de umidade no leito, a célula de secagem esquematizada na Figura 3.9 foi preenchida com folhas de manjeriço *in-natura*, totalizando uma massa de aproximadamente 125,0 g ($\rho_b \cong 0,139 \text{ g.cm}^{-3}$), e acoplada à extremidade da unidade experimental 1 (Figura 3.5). Após tempos de secagem pré-determinados (40, 120, 180, 240 e 360 minutos), a célula era fragmentada e o conteúdo de umidade das folhas nas diferentes camadas do leito era determinado. Os valores de umidade (b.s.) obtidos nos experimentos foram utilizados para a construção dos gráficos de M (b.s.) em função de t (min).

3.3.3.3 Encolhimento ‘controlado’

Nos experimentos de secagem com encolhimento ‘controlado’, a célula cujo esquema encontra-se na Figura 3.10 foi preenchida com folhas de manjeriço *in-natura*, totalizando uma massa de aproximadamente 150,0 g ($\rho_b \cong 0,139 \text{ g.cm}^{-3}$), o ‘contrapeso’ foi colocado sobre o leito de folhas e medidas simultâneas de queda de pressão e encolhimento do leito foram realizadas em intervalos de tempo de 10 minutos. As medidas de ΔP foram obtidas entre as tomadas de pressão localizadas entre as posições $z=1,5$ e $5,5$ cm ($L=4,0$ cm), $z=1,5$ e $9,5$ ($L=8,0$ cm) e $z=1,5$ e $13,5$ cm ($L=12,0$ cm), e uma régua milimetrada foi usada nas medidas da deformação do leito. Com os valores de ΔP e altura do leito (H) foram construídos, respectivamente, os gráficos de $\Delta P/L$ (Pa.cm^{-1}) em função do tempo (min) e H (cm) em função do tempo (min).

3.3.4 Secagem em leitos ‘fluidizado’ e vibro-aerado

3.3.4.1 Curvas de ΔP em função de U

Os ensaios para obtenção das curvas de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para os leitos de folhas consistiram na passagem ascendente do ar através do leito. Partindo da condição de leito fixo, a vazão do ar foi lentamente aumentada até o valor máximo inferior ao de elutriação das partículas e, depois de alcançado o regime estacionário, os valores de queda de pressão foram obtidos para velocidades decrescentes do ar. Para o leito vibro-aerado, seguiu-se o mesmo procedimento, sendo a vibração inserida no sistema após este ter atingido o regime estacionário. O comportamento característico foi analisado através das curvas de ΔP em função de U do ar e da observação visual do leito.

A influência da altura de leito estático sobre o comportamento fluidodinâmico obtido nos leitos foi verificada para três diferentes massas de folhas de manjeriço: 98,0 g, 178,0 g e 358,0 g, e que forneceram alturas estáticas médias (H_0) de, respectivamente, 5,0 cm, 10 cm e 20 cm. O adimensional de vibração (Equação (13)), foi utilizado para quantificar a intensidade vibracional imposta ao sistema e valores de Γ iguais a 0,5 e 1,0 foram testados para duas diferentes amplitudes vibracionais: 0,4 e 0,5 cm. Todos os ensaios foram realizados em triplicata com reempacotamento da coluna a cada novo experimento.

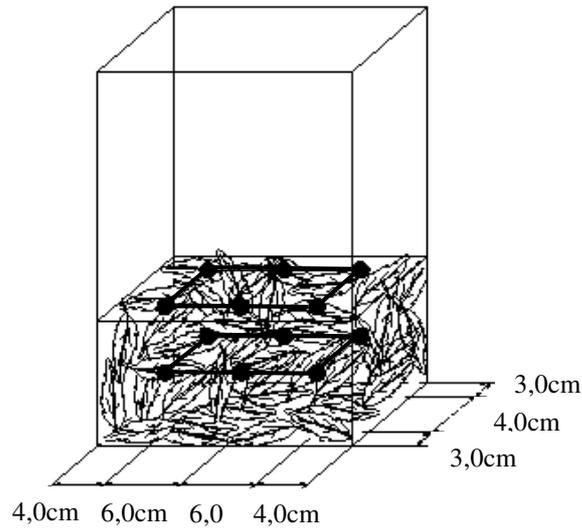
3.3.4.2 Verificação da homogeneidade da secagem

Com o intuito de verificar a homogeneidade da secagem do leito de folhas foram realizados ensaios de secagem em leito ‘fluidizado’ ($\Gamma=0,0$) e vibro-aerado, determinando a umidade das folhas em diferentes posições axiais e horizontais do leito para diferentes tempos de secagem.

Para a realização dos experimentos em leito ‘fluidizado’, foram inseridas na coluna aproximadamente 178,0 g de folhas de manjeriço ($H_0=10$ cm). Após atingir os tempos de secagem pré-determinados para cada ensaio (2, 6, 8, 10 e 14 horas), o equipamento era desligado e a coleta do material realizada em doze pontos do leito, sendo seis na superfície e os outros seis localizados aproximadamente na metade da altura da camada de folhas, conforme esquematizado na Figura 3.14. Em seguida, os teores de umidade das amostras de folhas coletadas foram determinados e os valores de teor de umidade (b.s.) obtidos nos

diferentes pontos de amostragem foram inseridos em gráficos em função do comprimento e largura do leito.

Figura 3.14 – Esquema da distribuição dos pontos de amostragem para verificação da homogeneidade da secagem das folhas no leito.



Fonte: Acervo pessoal.

Um ensaio de secagem com duração de 8 horas foi realizado introduzindo a vibração no leito no início do processo. No experimento realizado utilizou-se $\Gamma=1,0$ e amplitude vibracional (A) igual a $5,0 \times 10^{-3}$ m. O gráfico de teor de umidade (b.s.) nos diferentes pontos de amostragem em função do comprimento e largura do leito foi comparado com os obtidos nos ensaios de secagem sem o uso de vibração.

4 RESULTADOS

No presente capítulo serão apresentados e discutidos os principais resultados obtidos neste trabalho a partir das metodologias descritas no capítulo anterior. O capítulo foi estruturado da seguinte forma: inicialmente serão apresentadas algumas considerações preliminares sobre as dificuldades observadas ao se trabalhar com a secagem de folhas. Em seguida, serão apresentados os resultados obtidos na caracterização física, físico-química e térmica das folhas de manjeriço e nos ensaios preliminares. Será então analisada a secagem em camada fina de folhas inteiras, considerado aqui como um caso ‘padrão’ por ser a configuração de secagem mais amplamente investigada na literatura para este tipo de material. Uma análise crítica sobre a maneira como a secagem de folhas tem sido abordada e analisada na literatura será apresentada. Posteriormente serão discutidos os resultados obtidos para a secagem e o comportamento fluidodinâmico de ‘pacotes’ de folhas inteiras quando submetidos a diferentes formas de contato sólido-fluido. Finalmente serão discutidos os resultados obtidos na secagem das folhas para diferentes razões D/d_m (diâmetro da célula de secagem/dimensão média da partícula), comparando-se os resultados obtidos para a secagem de folhas de manjeriço inteiras, cortadas em 2 partes e em 4 partes.

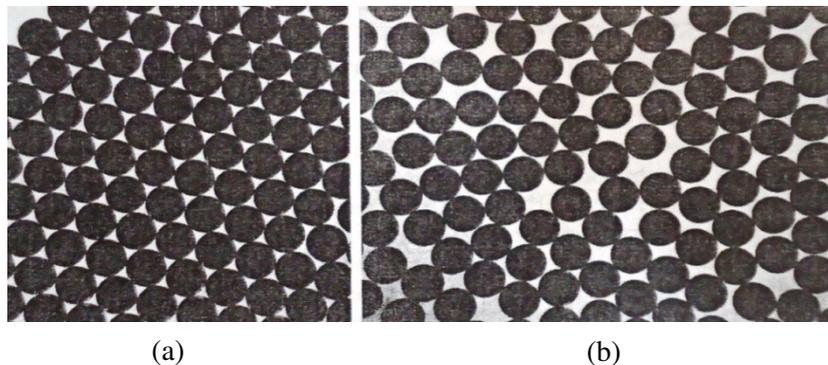
4.1 Considerações preliminares

Foram constatadas no decorrer deste trabalho várias dificuldades para a análise da secagem convectiva de folhas. Em primeiro lugar, tem-se a variabilidade biológica, que é inerente ao material. As folhas apresentam variações no tamanho e forma, e possuem textura e rugosidades superficiais que também podem variar. Além disso, a composição química das plantas pode mudar bastante em razão de fatores genéticos, clima, qualidade do solo e outros fatores externos (BATALHA; MING, 2003). Isso faz com que cada amostra de folhas seja única, não sendo possível garantir que as características das amostras usadas nos diferentes ensaios de secagem sejam similares.

Outra dificuldade refere-se às características dos ‘pacotes’ formados por folhas, já que a secagem não é feita para uma folha isolada, mas para um conjunto de folhas agrupadas. Como mostra a Figura 4.1, existem dois tipos de estruturas de empacotamento de partículas denominadas ordenada e aleatória. Uma estrutura ordenada (Figura 4.1(a)) ocorre

quando as partículas são colocadas sistematicamente em posições periódicas, resultando em um arranjo uniforme. Por outro lado, o empacotamento aleatório (Figura 4.1(b)) é construído por uma sequência de ‘eventos’ que não se relacionam entre si. Assim, o número de coordenação, a densidade de empacotamento e o tamanho das regiões de vazios variam localmente em estruturas aleatórias. Além disso, a densidade *bulk* obtida em empacotamentos aleatórios depende do procedimento utilizado na construção do ‘pacote’, e pode variar muito entre as duas condições limite: a densidade *bulk* solta e a densidade *bulk* densa ou compactada (GERMAN, 1989).

Figura 4.1 – Esquema representativo de um empacotamento (a) ordenado e (b) aleatório de discos.



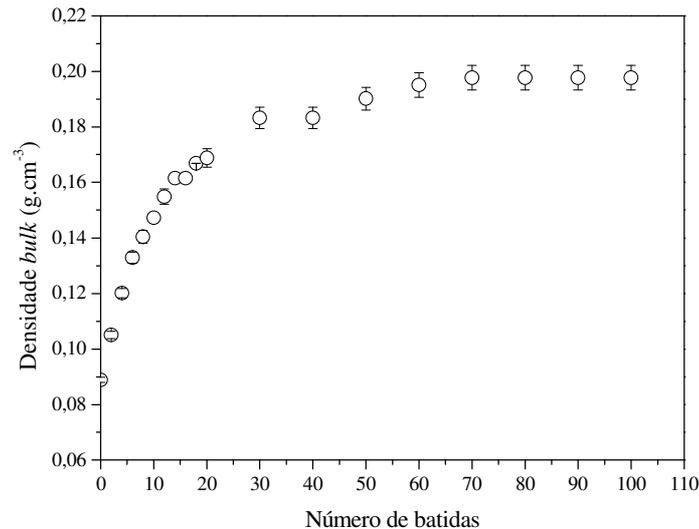
Fonte: German (1989).

Materiais com tamanhos e formas irregulares, e texturas superficiais rugosas, como as folhas, geram maiores forças de fricção interpartículas, influenciando a aglomeração e segregação dos materiais. Isto faz com que empacotamentos formados por folhas formem leitos muito heterogêneos. Dessa forma, propriedades locais, tais como a permeabilidade, que é uma medida da facilidade de escoamento do fluido através de seus vazios ou interstícios e que influi diretamente nos processos de transferência de calor e massa que ocorrem ao longo da secagem, variam com a posição nos leitos constituídos por folhas.

Foi constatado ainda que os leitos formados por folhas de manjerição apresentam uma elevada variação na densidade *bulk* (aproximadamente 122%) entre as condições ‘solta’ ($\rho_{bulk\ solta}=0,089\text{ g.cm}^{-3}$) e ‘compactada’ ($\rho_{bulk\ compactada}=0,198\text{ g.cm}^{-3}$) como pode ser notado na Figura 4.2, que mostra um gráfico de densidade *bulk* em função do número de batidas verticais do leito, obtida segundo a metodologia descrita no item 3.1.2. Entretanto, diferentemente de ‘pacotes’ aleatórios formados por partículas regulares, os ‘pacotes’ de folhas não podem ser reproduzidos ainda que o procedimento adotado para o empacotamento do leito seja repetido de forma idêntica em diferentes ensaios, o que se deve

às características do material (a folha é plana, suas dimensões em geral são grandes, é flexível, sua massa específica é baixa, tem alta rugosidade superficial, etc.) e também ao fato de cada amostra de folhas ser única. A combinação destas características torna muito difícil reproduzir arranjos com propriedades similares.

Figura 4.2 – Densidade *bulk* em função do número de batidas para folhas de manjericão inteiras.

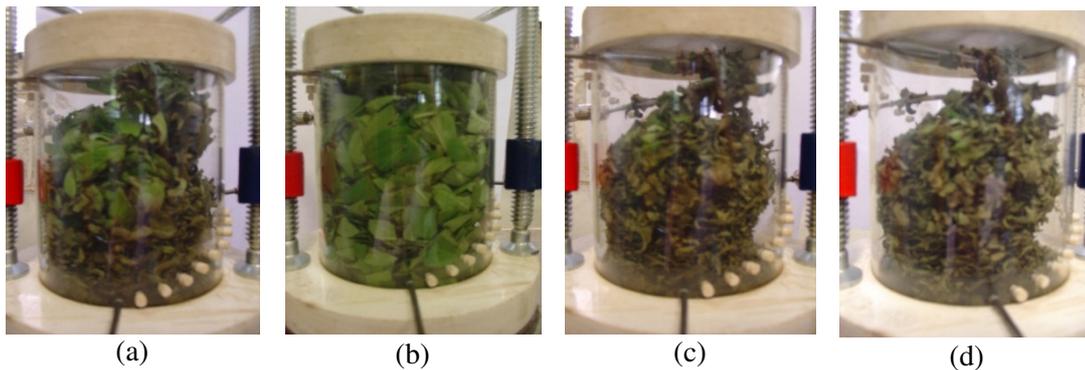


Fonte: Acervo pessoal.

Além disso, dependendo das dimensões das folhas e do recipiente utilizado, a relação D/d_m para as folhas inteiras pode não ser suficientemente alta para supor que os efeitos de parede possam ser negligenciados. Por exemplo, no caso de partículas rígidas e regulares como esferas e cilindros, a razão D/d_m mínima para a qual é possível negligenciar os efeitos de parede sobre o empacotamento do leito é igual a 24 e 16, respectivamente (ZOTIN, 1985). A maior dimensão da folha de manjericão é em média igual a 3,29 cm, e as células de secagem utilizadas neste estudo têm diâmetros de aproximadamente 10 cm. Estes valores resultam em uma razão $D/d_m \cong 4,2$. As folhas inteiras aqui estudadas não apresentam características de partículas regulares, mas pode-se inferir que a razão D/d_m encontrada é pequena. Assim, a formação de canais (*channeling*) pode ser esperada pela ocorrência de efeitos de parede, formando uma região de baixa resistência por onde uma quantidade significativa de fluido escoar preferencialmente. Como resultado, o contato fluido-sólido através do leito, que não é uniforme devido aos problemas já mencionados, piora ainda mais nas vizinhanças da parede.

Outra dificuldade observada no estudo sobre secagem de folhas foi o encolhimento provocado pela redução de umidade ao longo do tempo. A Figura 4.3 mostra fotografias obtidas durante a secagem de folhas de manjeriço em diferentes tempos de secagem, onde é possível notar que o encolhimento é substancial e agrava a canalização, provocando mudanças na estrutura do leito e, conseqüentemente, na interação entre o fluido de secagem e as folhas, o que torna a secagem ainda menos homogênea. Embora a maioria dos materiais biológicos experimentem diferentes níveis de encolhimento durante o processo de secagem, e as informações da literatura sobre o nível mínimo de encolhimento que possa levar a uma diferença significativa na estimativa de parâmetros cinéticos ainda seja escassa (SHITTU; RAJI, 2011), o grau de encolhimento observado na Figura 4.3 indica que no caso das folhas de manjeriço ele não pode ser negligenciado.

Figura 4.3 – Fotografias da célula durante a secagem das folhas de manjeriço; $T=60^{\circ}\text{C}$; tempo de secagem: (a) 0 minutos; (b) 60 minutos; (c) 150 minutos e (d) 200 minutos.



Fonte: Acervo pessoal.

Da análise apresentada, pode-se inferir que os problemas observados começam muito antes da secagem e estão associados à própria estrutura dos empacotamentos utilizados. Como pôde ser constatado na revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2, não foram encontrados na literatura publicada sobre secagem de folhas, trabalhos em que a folha seja analisada como um material particulado, portanto os problemas relatados aqui raramente são mencionados. No entanto, como a maioria das metodologias experimentais e modelos desenvolvidos para a secagem de meios porosos é baseada nas suposições de que os meios são homogêneos e reprodutíveis, a sua aplicação no caso das folhas requer uma análise criteriosa.

4.2 Caracterização do material

4.2.1 Propriedades físico-químicas

Na Tabela 4.1 estão apresentados os valores obtidos na caracterização físico-química das folhas de manjerição inteiras. As propriedades medidas foram diâmetros de Feret (d_F) máximo e mínimo, diâmetro médio, área projetada (A_{proj}), perímetro (P), área superficial (A_p), volume (V_p), razão A_p/V_p , esfericidade (ϕ), espessura (δ) e massa específica (ρ_p). As dimensões características e a área superficial obtidas para as folhas cortadas foram também incluídas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Propriedades físico-químicas das folhas de manjerição.

Material	Folhas inteiras	Folhas em 2 partes	Folhas em 4 partes
d_F máximo (cm)	3,29±0,20	2,32±0,18	2,07±0,22
d_F mínimo (cm)	1,94±0,18	1,82±0,22	1,11±0,11
d_m (cm)	2,36±0,18	1,87±0,16	1,29±0,00
A_{proj} (cm ²)	4,55±0,66	2,91±0,46	1,43±0,23
P (cm)	9,54±1,16	6,77±0,56	5,09±0,48
A_p (cm ²)	9,32	5,98	2,98
ϕ (-)	0,160	0,198	0,181
V_p (cm ³)	0,116	-	-
A_p/V_p (cm ⁻¹)	80	-	-
δ (cm)		0,023±0,002	
M_i (b.s.)		7,10	
ρ_p (g.cm ⁻³)		0,874±0,046	

Fonte: Acervo pessoal.

As folhas estudadas apresentam uma esfericidade baixa, menor que 0,2, elevada área projetada ($A_{proj} \cong 4,55$ cm²) e pequena espessura ($\delta \cong 0,023$ cm). Apresentam ainda volume pequeno ($V_p \cong 0,116$ cm³), o que resulta em uma alta razão A_p/V_p , igual a 80.

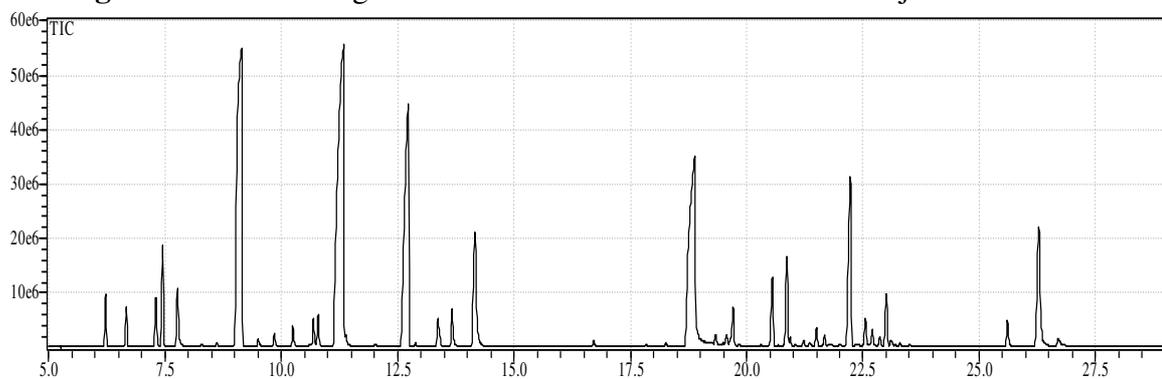
Observa-se que o valor de massa específica encontrado para as folhas de manjerição *in-natura*, 0,874 g.cm⁻³, concorda bem com os encontrados por Lima (2009) para folhas das espécies *Duranta repens* e *Schinus molle*, com diferenças de até 10%. Esse tipo de material apresenta elevado teor de umidade, sendo o valor de M (b.u.) obtido para as folhas *in-natura* de manjerição igual a 88,3 ± 0,2%. Özcan, Arslan e Ünver (2005) obtiveram um valor de umidade inicial para as folhas de manjerição igual a 84,67 %, valor próximo ao obtido neste trabalho.

O óleo essencial extraído das folhas *in-natura* de manjeriço apresentou rendimento de 0,40 % (m/m) e caracteriza-se como um líquido viscoso, de coloração amarelada e odor intenso típico da planta.

O rendimento de óleos essenciais extraídos de uma mesma espécie pode apresentar variações significativas como consequência de fatores genéticos, época e horário de colheita da planta, processo utilizado para extração do óleo essencial, dentre outros (BATALHA; MING, 2003). No entanto, os valores aqui obtidos mostraram boa concordância com alguns valores encontrados na literatura para a espécie *O. basilicum*. Gonçalves et al. (2007) obtiveram rendimentos de óleo essencial com valores entre 0,40 e 0,50% na extração de folhas de manjeriço (100 g) pelo processo de destilação por arraste a vapor com duração de 3 horas. Koutsos, Chatzopoulou e Katsiotis (2009) encontraram um teor de óleo essencial igual a 0,20% na extração de folhas *in-natura* em água destilada usando aparato tipo Clevenger durante 2 horas. Ainda, segundo Ribeiro e Diniz (2008), o teor de óleo obtido na extração das folhas de *O. basilicum* pode variar entre 0,04 e 0,40%.

Para a análise do óleo de manjeriço, a amostra foi injetada no CG-EM e foi obtido o cromatograma mostrado na Figura 4.4, onde é possível observar quinze picos principais, que correspondem aos compostos majoritários presentes e que juntos totalizam 87,42% do óleo. A Tabela 4.2 mostra os compostos identificados no óleo e respectivas fórmulas moleculares, assim como a porcentagem relativa de cada composto. Este óleo apresentou como componentes majoritários o linalol (21,41%), o 1,8-cineole (16,91%), o eugenol (14,06%) e a cânfora (11,10%).

Figura 4.4 – Cromatograma do óleo essencial das folhas de manjeriço *in-natura*.



Fonte: Acervo pessoal.

Tabela 4.2 – Composição química do óleo essencial das folhas de manjeriço *in-natura*.

Composto	Nome	FM	(%)	t _R (min)
1	alpha-pinene	C ₁₀ H ₁₆	0,91	6,222
2	camphene	C ₁₀ H ₁₆	0,69	6,668
3	sabinene	C ₁₀ H ₁₆	0,95	7,303
4	2-beta-pinene	C ₁₀ H ₁₆	1,86	7,450
5	beta-mircene	C ₁₀ H ₁₆	1,47	7,769
6	1,8-cineole	C ₁₀ H ₁₈ O	16,91	9,146
7	L-linalol	C ₁₀ H ₁₈ O	21,41	11,339
8	cânfora	C ₁₀ H ₁₆ O	11,10	12,724
9	3-cyclohexene-1-metanol	C ₁₀ H ₁₈ O	4,06	14,160
10	p-eugenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	14,06	18,883
11	trans-caryophyllene	C ₁₅ H ₂₄	1,59	20,555
12	alpha-bergamotene	C ₁₅ H ₂₄	2,03	20,869
13	Germacrene D	C ₁₅ H ₂₄	4,88	22,226
14	gamma-cadinene	C ₁₅ H ₂₄	1,16	23,003
15	tau-cadinol	C ₁₅ H ₂₆ O	4,34	26,282

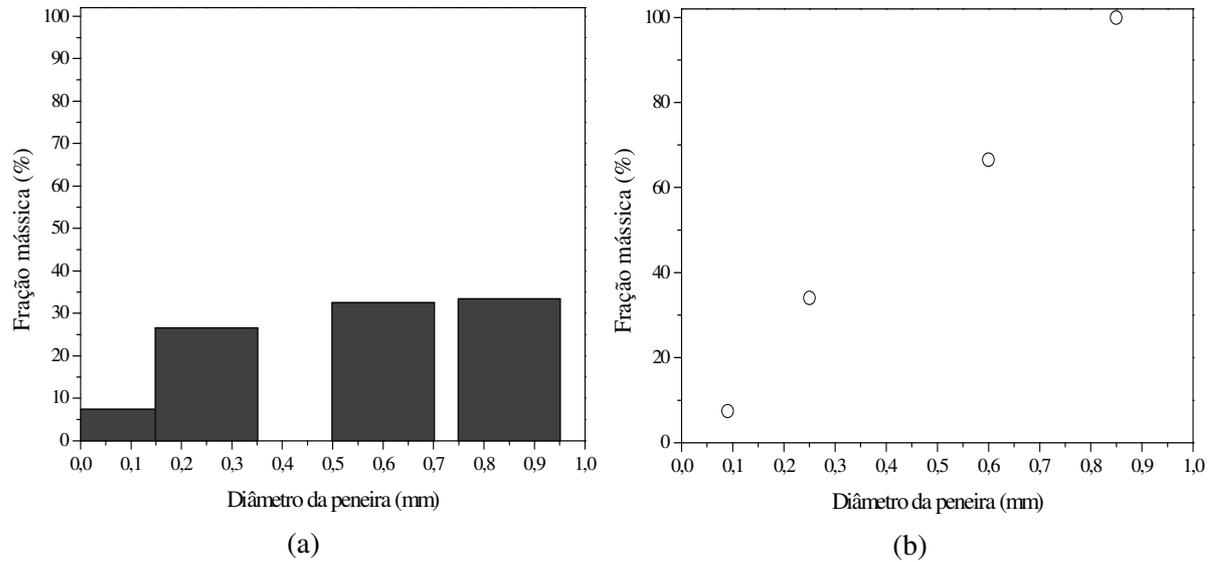
Fonte: Acervo pessoal.

4.2.2 Propriedades térmicas

Como descrito no item 3.1.1, as propriedades térmicas foram determinadas utilizando as folhas de manjeriço desidratadas ($M \cong 12\%$ (b.u.)) e pulverizadas. A determinação destas propriedades para o material da folha pode ser justificada pelo fato de os leitões de folhas inteiras não serem homogêneos, ocasionando um péssimo contato entre o meio (folhas) e a sonda, e inviabilizando o uso do método da sonda linear para a determinação da condutividade térmica efetiva (k_{ef}) do meio.

As folhas secas de manjeriço usadas na caracterização térmica foram manualmente pulverizadas e, em seguida, fez-se a análise granulométrica do pó. Foram obtidas a distribuição granulométrica e distribuição granulométrica acumulada mostradas na Figura 4.5(a) e Figura 4.5(b), respectivamente. A partir dessa distribuição, obteve-se um diâmetro médio de peneira (D_s) para as partículas de manjeriço desidratado igual a 0,354 mm.

Figura 4.5 – Fração mássica das folhas de manjeriço em função do diâmetro da peneira: (a) distribuição granulométrica e (b) distribuição granulométrica acumulada.



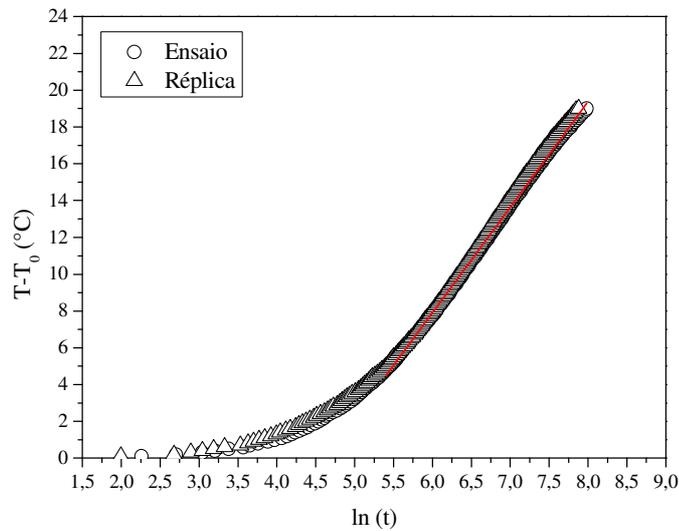
Fonte: Acervo pessoal.

4.2.2.1 Condutividade térmica

A Figura 4.6 mostra as curvas de T em função de $\ln(t)$ obtidas para as folhas de manjeriço secas e pulverizadas. A partir do trecho linear das curvas, que foi obtido descartando-se pontos experimentais a partir do tempo inicial até que o coeficiente de determinação (R^2) fosse igual ou superior a 0,99, e utilizando-se a Equação (48), determinou-se a condutividade térmica efetiva do material. Os valores de k_{ef} obtidos nos ensaios realizados, bem como o valor médio e desvio padrão, estão mostrados na Tabela 4.3, onde é possível notar o baixo desvio padrão. A boa reprodutibilidade das medidas também pode ser observada ao se comparar os dados obtidos entre o ensaio e a réplica na Figura 4.6, corroborando a adequabilidade da sonda utilizada para determinar a condutividade térmica efetiva das folhas de manjeriço pulverizadas.

Não foram encontrados na literatura dados de condutividade térmica efetiva de folhas. Dessa forma, os resultados foram comparados com os obtidos por Pereira (2010) para sementes de painço (*Setaria italica* L.) em pó ($D_s=0,215$ mm), utilizando a mesma metodologia do presente trabalho. Para leitos constituídos por este material foram encontrados valores de k_{ef} na faixa de 0,058 a 0,104 $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ para porosidades *bulk* variando entre, respectivamente, 0,603 e 0,345 e, levando-se em consideração o fato de se tratar de uma espécie biológica diferente, o valor obtido para as folhas de manjeriço secas e pulverizadas, que foi de 0,050 $W.m^{-1}.^{\circ}K^{-1}$, é da mesma ordem de grandeza.

Figura 4.6 – Curvas obtidas na determinação da condutividade térmica efetiva das folhas de manjeriço secas e pulverizadas pelo método da sonda linear.



Fonte: Acervo pessoal.

Tabela 4.3 – Valores de condutividade térmica efetiva obtidos para as folhas de manjeriço secas e em pó utilizando o método da sonda linear.

	$k_{ef} (Wm^{-1}K^{-1})$
Ensaio	0,0511
Réplica	0,0489
Valor médio	0,0500
Desvio Padrão	0,0016

Fonte: Acervo pessoal.

4.2.2.2 Calor específico

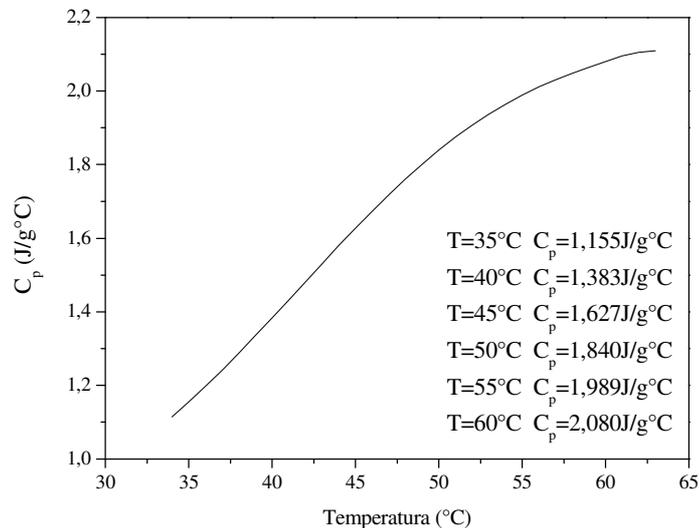
A Figura 4.7 mostra os resultados provenientes da calorimetria de varredura diferencial realizada para as folhas de manjeriço secas e pulverizadas. Nota-se que o calor específico das folhas secas variou de 1,114 a 2,110 J/g°C na faixa de temperatura entre 34 e 63°C, sendo representado pelo seguinte ajuste polinomial ($R^2=0,998$):

$$C_p = -1,92 + 0,116T - 8,19 \times 10^{-4}T^2 \quad (56)$$

Zanoelo, Benincá e Ribeiro (2011) realizaram ensaios experimentais para a determinação do calor específico de folhas secas de erva-mate (7% b.s.) utilizando o método das misturas e um calorímetro quase-adiabático. Os autores utilizaram água na temperatura de 330 K como fluido calorimétrico e encontraram para as folhas de erva-mate um valor de C_p

igual a $1,78 \pm 0,45$ J/gK, valor este que se encontra dentro da faixa de calores específicos obtidos para as folhas secas de manjeriço.

Figura 4.7 – Calor específico das folhas de manjeriço secas e pulverizadas pelo método da calorimetria de varredura diferencial.



Fonte: Acervo pessoal.

4.2.3 Umidade de equilíbrio

A Tabela 4.4 apresenta os valores médios e respectivos desvios padrão obtidos para o conteúdo de umidade de equilíbrio (M_e) das folhas de manjeriço durante os ensaios de sorção nas temperaturas de 30, 45 e 60°C em função da umidade relativa do ar (R_h). Os baixos valores de desvios padrão observados confirmam a representatividade da média.

Além disso, e como já era esperado, os resultados indicam que tanto a temperatura quanto a umidade relativa do ar exerceram efeito significativo nos valores de conteúdo de umidade de equilíbrio (M_e) obtidos experimentalmente. De maneira geral, observa-se que, a uma umidade relativa constante, os valores de umidade de equilíbrio diminuíram com o aumento da temperatura de 30 para 60°C. Este efeito está relacionado ao fato de que, em maiores temperaturas, as moléculas de água se encontram em um estado de excitação mais alto, o que reduz as forças atrativas entre elas, levando a uma diminuição da capacidade de sorção do material (MOHAMED et al., 2005). Para as folhas de manjeriço, entretanto, é possível notar de acordo com a Figura 4.8, uma inversão do efeito de T nas isotermas obtidas a 30 e 45°C para valores de R_h maiores que aproximadamente 0,7. Segundo Al-Muhtaseb, McMinn e Magee (2002), este comportamento pode estar relacionado à composição do material: em valores de atividade de água maiores que 0,7, a água é sorvida

por componentes de baixo peso molecular que compensam o efeito da temperatura, levando a um aumento de M_e e, conseqüentemente, à intersecção das isotermas. Comportamento semelhante foi obtido por Uribe et al. (2008) durante a sorção de umidade em folhas de aloe vera. Segundo os autores, a intersecção das isotermas ocorre porque em altos valores de atividade de água, o conteúdo de umidade do material aumenta levando a uma maior solubilidade dos carboidratos presentes (glicose, frutose, galactose e arabinose).

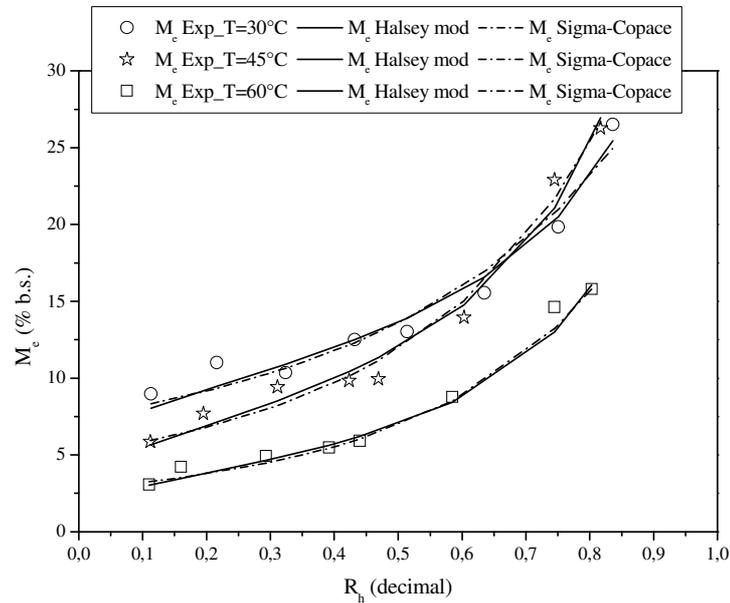
Tabela 4.4 – Valores de umidade de equilíbrio e respectivos desvios padrão obtidos para as folhas de manjeriço durante a dessorção de umidade em função de T e R_h .

T=30°C		T=45°C		T=60°C	
R_h (decimal)	M_e (%b.s.) Manjeriço	R_h (decimal)	M_e (%b.s.) Manjeriço	R_h (decimal)	M_e (%b.s.) Manjeriço
0,113	8,97±0,99	0,112	5,87±1,50	0,110	3,06±0,61
0,216	11,01±0,85	0,195	7,71±0,47	0,160	4,22±0,21
0,324	10,35±0,61	0,311	9,42±0,55	0,293	4,92±0,29
0,432	12,50±0,37	0,423	9,84±1,05	0,392	5,48±1,56
0,514	13,02±0,53	0,469	9,95±0,50	0,440	5,93±0,71
0,635	15,55±0,94	0,603	13,95±1,00	0,585	8,78±1,30
0,751	19,84±0,43	0,745	22,92±0,91	0,745	14,62±1,09
0,836	26,52±1,28	0,817	26,29±1,12	0,803	15,80±1,70

Fonte: Acervo pessoal.

Os valores de conteúdo de umidade de equilíbrio higroscópico obtidos experimentalmente foram ajustados aos modelos de Oswin modificado, Chung-Pfost, Henderson-Thompson, Halsey modificado e Sigma-Copace (ver Tabela 2.2) e foram escolhidos por serem frequentemente utilizados na predição da umidade de equilíbrio de produtos agrícolas. Os parâmetros estimados, bem como os valores do coeficiente de determinação (R^2), da soma dos quadrados dos resíduos (SQR) e do erro relativo médio (ERM) para os modelos avaliados para prever M_e das folhas de manjeriço encontram-se na Tabela 4.5. A seleção dos modelos que melhor descreveram os dados experimentais de umidade de equilíbrio foi realizada considerando-se os valores de R^2 , SQR e ERM, além da verificação da distribuição dos resíduos (DRes).

Figura 4.8 – Comparação dos valores das isotermas de dessorção para as folhas de manjeriço nas temperaturas de 30, 45 e 60°C, com as estimativas obtidas pelos modelos de Halsey modificado e Sigma-Copace.



Fonte: Acervo pessoal.

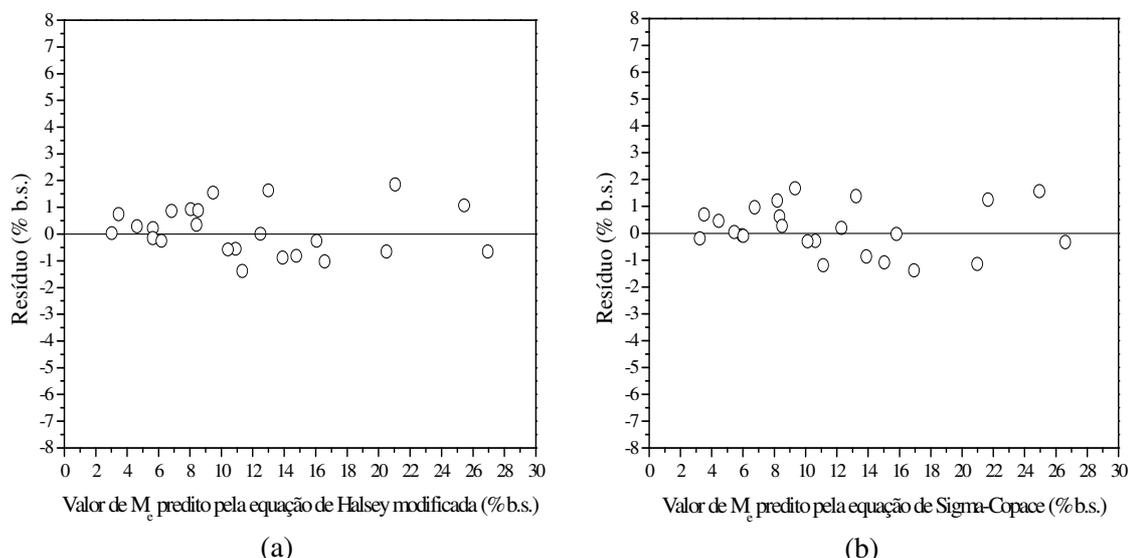
Analisando-se os resultados, é possível verificar que os modelos de Halsey modificado e Sigma-Copace, representados respectivamente pelas Equações (26) e (28), foram os que melhor se ajustaram aos dados experimentais de M_e para as temperaturas de 30, 45 e 60°C e umidades relativas variando entre 0,110 e 0,836, apresentando coeficientes de correlação $\geq 0,96$ e os menores valores de SQR e ERM ($< 10\%$). Para estes modelos, a Figura 4.9 apresenta os gráficos de resíduos *versus* valores preditos e mostram que os resíduos se encontram próximos a uma banda horizontal em torno do zero, indicando uma distribuição não tendenciosa e, assim, a adequação dos modelos para representar o comportamento das isotermas de dessorção das folhas de manjeriço.

Tabela 4.5 – Parâmetros dos modelos ajustados para calcular M_c das folhas de manjeriço em função de T e R_h , com os respectivos R^2 , SQR e ERM.

Folhas de Manjeriço															
	Halsey Modificado			Henderson-Thompson			Oswin Modificado			Chung-Pfost			Sigma-Copace		
	30°C	45°C	60°C	30°C	45°C	60°C	30°C	45°C	60°C	30°C	45°C	60°C	30°C	45°C	60°C
a	0,15	0,07	0,04	$1,00 \times 10^{-4}$	$5,02 \times 10^{-4}$	$7,67 \times 10^{-4}$	24,75	25,00	1,50	501,41	487,44	394,32	-0,02	-0,01	0,01
b	0,91	0,09	0,06	-5,00	-2,33	3,37	0,35	0,28	-0,10	0,15	0,12	0,19	$-3,70 \times 10^{-2}$	$-7,27 \times 10^{-3}$	$6,91 \times 10^{-3}$
c	2,17	1,52	1,39	2,09	1,35	1,29	0,34	0,49	0,53	47,55	99,82	62,62	0,92	1,31	1,42
R²	0,97	0,98	0,98	0,87	0,94	0,96	0,93	0,97	0,98	0,90	0,92	0,93	0,96	0,98	0,99
SQR	6,96	8,41	3,57	31,72	25,54	7,70	16,42	13,99	4,67	24,30	33,61	11,56	9,75	6,78	2,75
ERM	6,31	7,60	6,07	13,50	17,50	15,67	10,06	12,28	10,40	11,70	17,62	17,85	6,73	7,02	5,89
DRes	Aleatória			Aleatória			Aleatória			Aleatória			Aleatória		

Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4.9 – Distribuição dos resíduos em função dos valores de conteúdo de umidade de equilíbrio estimados pelos modelos de (a) Halsey modificado e (b) Sigma-Copace para folhas de manjerição para T=30, 45 e 60°C.



Fonte: Acervo pessoal.

Ainda que a adequação de um modelo para prever o conteúdo de umidade de equilíbrio possa divergir entre as diferentes espécies de plantas, o que se deve às diferenças físicas e químicas existentes entre elas, vários pesquisadores têm reportado que o modelo de Halsey modificado é o que estima com maior precisão as isotermas de equilíbrio de plantas tropicais, medicinais e com alto teor de voláteis (PHOUNGCHANDANG; SRINUKROH; LEENANON, 2008). Soysal e Öztekin (1999) verificaram que este foi o modelo que melhor reproduziu os valores de M_e para folhas de treze espécies de plantas medicinais e aromáticas. O modelo de Halsey modificado também resultou em melhores ajustes aos dados experimentais de umidade de equilíbrio para folhas de mate (ZANOELO, 2005) e da espécie *Citrus hystrix* DC. (PHOUNGCHANDANG; SRINUKROH; LEENANON, 2008), concordando com os resultados obtidos neste estudo para folhas de *O. basilicum*.

4.3 Ensaios preliminares

Os ensaios preliminares foram realizados devido à necessidade de avaliar a adequação dos equipamentos e instrumentos de medida utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

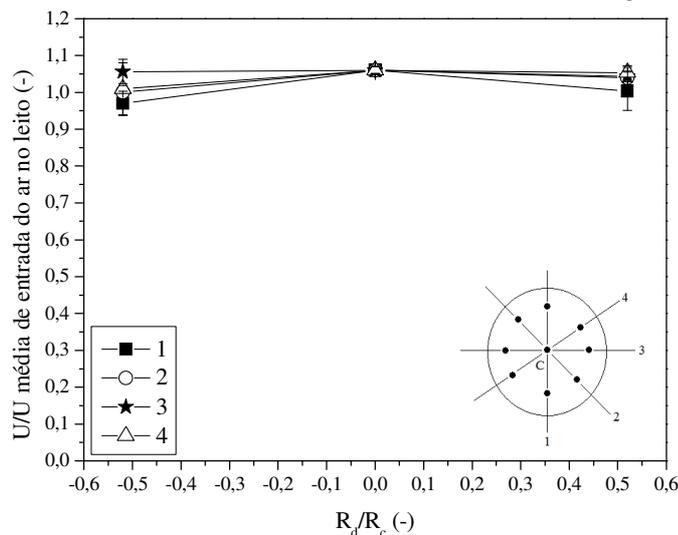
4.3.1 Verificação da uniformidade do escoamento do ar

(a) Unidade experimental 1

Para verificar a uniformidade do escoamento do fluido através da célula de secagem, a velocidade do fluido foi medida em oito pontos de amostragem e no ponto central da célula, como mostrado na Figura 3.6. Para os dois ensaios realizados, os desvios padrão dos valores de U obtidos nos diferentes pontos foram, na grande maioria dos casos, inferiores a 10%.

O adimensional de velocidade definido como sendo a média dos valores de U medidos em cada ponto de amostragem pela velocidade média de entrada do fluido no leito (\bar{U} de entrada = $1,50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) foi utilizado para a construção do gráfico da Figura 4.10, que mostra o adimensional da velocidade do ar em função de R_d/R_c , onde R_d é a distância medida através do centro da célula e R_c é o raio da célula de medida. Considerando os valores e respectivos desvios padrão, é possível observar que o escoamento do ar pode ser considerado uniforme. Valores um pouco menores de velocidade do ar foram obtidos nas proximidades da parede da célula, que é um comportamento esperado, uma vez que na interface fluido-parede, a velocidade é nula.

Figura 4.10 – Adimensional de velocidade do ar em função de R_d/R_c .



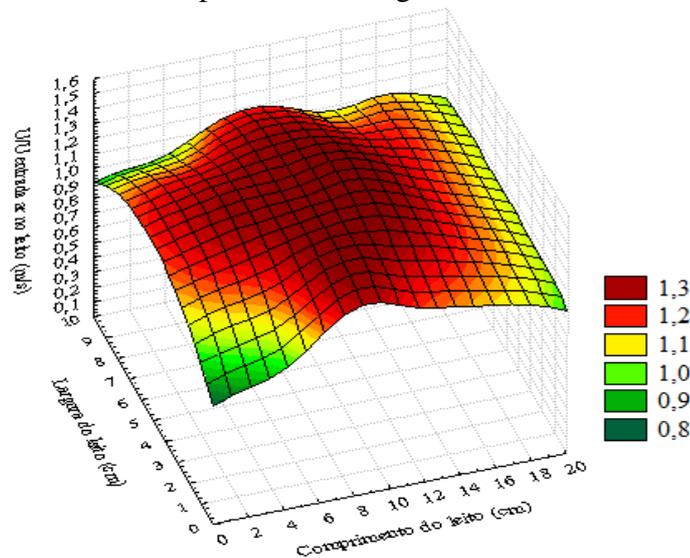
Fonte: Acervo pessoal.

(b) Unidade experimental 2

A uniformidade do escoamento do fluido através do leito retangular foi verificada medindo-se a velocidade do fluido em vinte e quatro pontos de amostragem (ver Figura 3.12). Para os dois ensaios realizados, os desvios padrão dos valores de U obtidos nos diferentes pontos foram, na grande maioria dos casos, inferiores a 10%.

O adimensional de velocidade foi utilizado para a obtenção da superfície de resposta que representa a distribuição de ar em função do comprimento e da largura da câmara do leito, como mostra a Figura 4.11 (velocidade de entrada do ar no leito = $1,01 \text{ m.s}^{-1}$). Assim como esperado, nota-se que a velocidade atinge valores máximos na região central da câmara e diminui próximo às paredes do leito. O escoamento do gás mostrou-se uniforme em cerca de 80% da área transversal da câmara, garantindo, dessa forma, que o fluido chega ao leito de secagem com uma distribuição adequada.

Figura 4.11 – Superfície de resposta do adimensional de velocidade do ar em função do comprimento e largura do leito.



Fonte: Acervo pessoal.

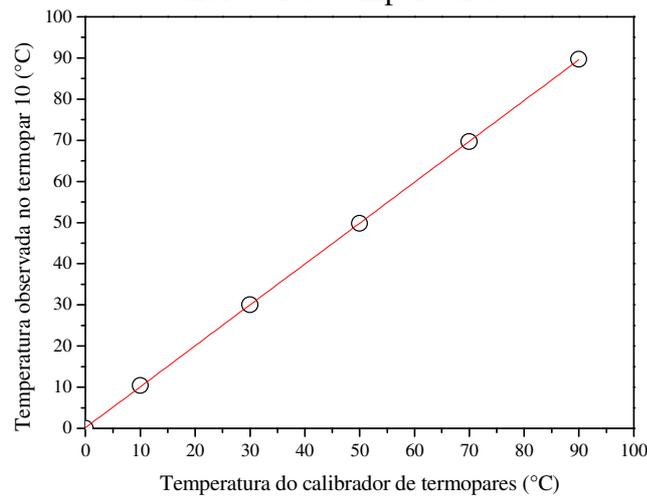
4.3.2 Calibração dos termopares

Anteriormente à realização dos experimentos de determinação dos perfis de temperatura nos leitos de folhas, foi realizada a calibração de onze termopares.

O gráfico da Figura 4.12 mostra os valores de temperatura medidos no termopar de nº 10 com os valores de referência ajustados no calibrador de termopares. Para

este termopar, o ajuste linear dos pontos experimentais resultou em um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,99997. Por motivos de concisão, somente este gráfico será aqui apresentado. Entretanto, para a realização dos experimentos subsequentes, foram selecionados os termopares que apresentaram os melhores ajustes, com $R^2 \geq 0,99994$.

Figura 4.12 – Relação entre os valores de temperatura medidos pelo termopar de número 10 e o calibrador de temperaturas.



Fonte: Acervo pessoal.

4.4 Cinética de secagem de folhas em leito fixo e camada delgada

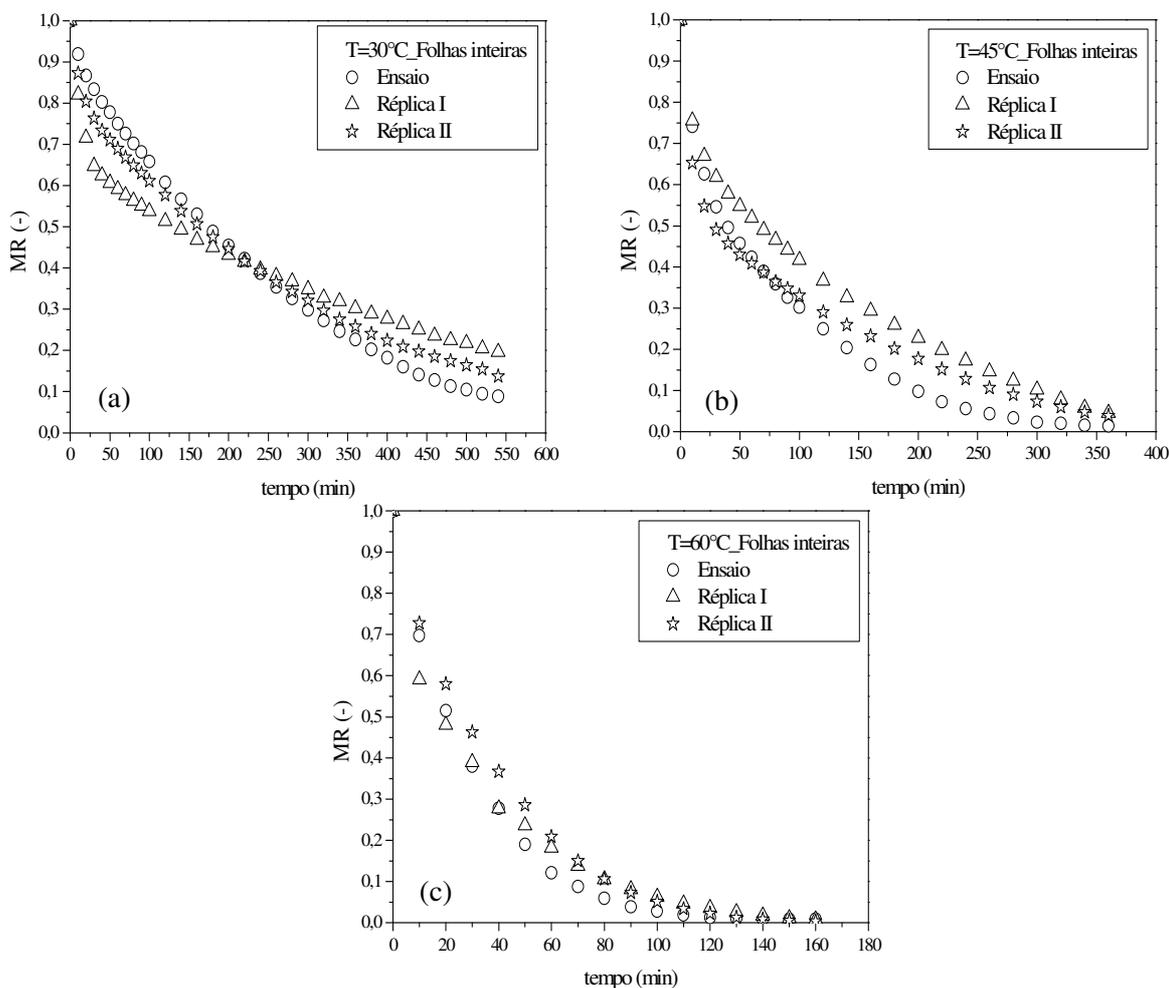
A secagem em camada fina ou delgada, para a qual as resistências internas ao transporte de calor e massa no interior do meio poroso são pequenas e podem ser desprezadas, será analisada como um caso “padrão”.

4.4.1 Estudo de caso

Nos ensaios de secagem das folhas de manjeriço em leito fixo e utilizando uma camada de material com espessura de 1,0 cm, observou-se que a diferença de temperatura do ar medida na entrada e saída da célula de secagem se manteve dentro do intervalo de incertezas experimentais ($\pm 0,5^\circ\text{C}$) em todas as condições estudadas, ou seja, os gradientes de temperatura foram desprezíveis ao longo da altura de folhas, caracterizando a condição de camada delgada. A densidade *bulk* dos leitos foi mantida em $0,166 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ e a reprodutibilidade dos ensaios foi avaliada através de repetições em condições idênticas.

A Figura 4.13 mostra as curvas de cinética de secagem obtidas durante a secagem de folhas inteiras de manjeriço nas temperaturas de 30, 45 e 60°C. É possível observar inicialmente que as curvas de MR em função do tempo para todas as temperaturas avaliadas apresentaram elevadas diferenças entre as réplicas, embora nos ensaios tenha sido usada a mesma massa de material e as amostras tenham sido inseridas na célula de secagem sempre da mesma forma.

Figura 4.13 – Adimensional de umidade em função do tempo para as folhas de manjeriço inteiras; $U=0,40\text{m.s}^{-1}$: (a) $T=30^\circ\text{C}$; (b) 45°C e (c) 60°C .



Fonte: Acervo pessoal.

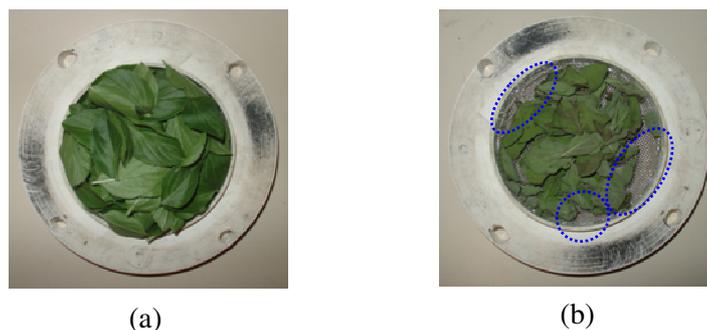
Por exemplo, se tomarmos nas curvas de secagem para $T=30^\circ\text{C}$ os valores de MR para um tempo de 520 minutos, observamos que MR variou de 0,09 (Ensaio) para 0,20 (Réplica I). Nas curvas de secagem obtidas para $T=45^\circ\text{C}$, o adimensional de umidade variou entre 0,10 (Ensaio) e 0,23 (Réplica I) para $t=200$ minutos e entre 0,02 (Ensaio) e 0,05 (Réplica I) para $t=110$ minutos nos ensaios usando temperatura igual a 60°C . Essas variações,

que chegam a 150%, não podem ser consideradas desprezíveis, ou seja, as curvas apresentadas na Figura 4.13 indicam que a secagem muda para condições idênticas de temperatura e velocidade do ar de secagem, sugerindo a ocorrência de alterações na ‘estrutura’ dos pacotes formados por folhas.

As mudanças na estrutura são agravadas ao longo do processo devido ao encolhimento do leito e conseqüente formação de vazios, nos quais não se observa a presença de material particulado, e que se concentram, sobretudo, nas proximidades das paredes da célula. Isto pode ser visualizado na Figura 4.14 que mostra fotografias das células de medida contendo folhas *in-natura* (antes da secagem) e após 540 minutos de secagem na temperatura de 30°C.

A falta de reprodutibilidade observada nos ensaios de secagem com folhas pode ser atribuída às características destes materiais, que como apresentado no item 4.1, formam pacotes não homogêneos e que não se reproduzem em diferentes ensaios. Com leitos de diferentes estruturas, as interações fluido-partícula, que são determinantes no processo, mudam em cada caso, resultando em variações nas curvas de cinética de secagem. Como consequência, os ajustes de modelos matemáticos aos dados experimentais de cinética de secagem de folhas, que são amplamente encontrados na literatura, tornam-se pouco confiáveis.

Figura 4.14 – Fotografias da célula obtidas durante a secagem em camada fina para as folhas inteiras de manjeriço; T=30°C; tempo de secagem: (a) 0 e (b) 540 minutos.

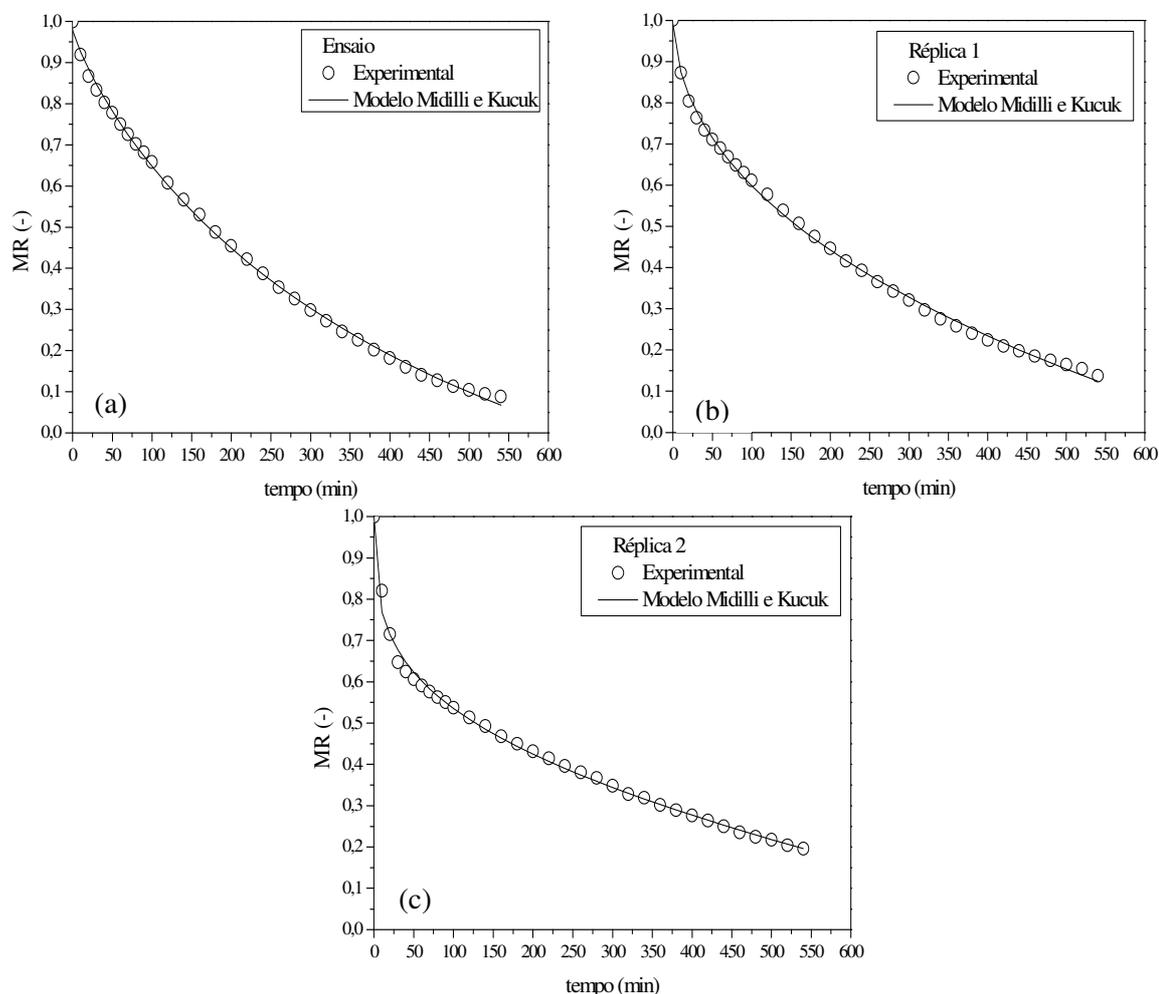


Fonte: Acervo pessoal.

Por exemplo, se tomarmos as curvas obtidas para a temperatura de 30°C e ajustarmos o modelo empírico de Midilli e Kucuk (Equação 12), que foi aqui escolhido por apresentar bom ajuste aos dados experimentais, podemos observar que este modelo mostra-se, a princípio, adequado para a previsão das curvas de MR em função do tempo de secagem (ver Figura 4.15), resultando em valores de coeficiente de determinação (R^2) próximos à unidade e

baixos valores de soma dos quadrados dos resíduos (SQR) e erros relativos médios (ERM), como mostra a Tabela 4.6. Entretanto, é possível notar que os coeficientes obtidos no ajuste do modelo diferem significativamente entre os diferentes ensaios. O parâmetro k do modelo, por exemplo, varia entre 0,008 (Ensaio) e 0,121 (Réplica II), ou seja, aumenta em 15 vezes entre os três ensaios realizados neste trabalho. Isto nos permite inferir que, embora os parâmetros estatísticos sejam bons, diferentes coeficientes do modelo são obtidos para cada ensaio, o que torna esta abordagem pouco útil.

Figura 4.15 – Adimensional de umidade em função do tempo para $T=30^{\circ}\text{C}$; $U=0,40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ e folhas inteiras, e estimativas obtidas pelo modelo de Midilli e Kucuk: (a) Ensaio; (b) Réplica 1 e (c) Réplica 2.



Fonte: Acervo pessoal.

Para se ter uma regularidade estatística quando da análise dos dados seria necessário que os experimentos tivessem um grande número de repetições. Deste modo, a falta de reprodutibilidade observada nos ensaios com folhas é um fator a ser considerado ao se

trabalhar com este tipo de material e uma pequena amostragem e, assim, os ajustes obtidos para os demais modelos não serão aqui apresentados.

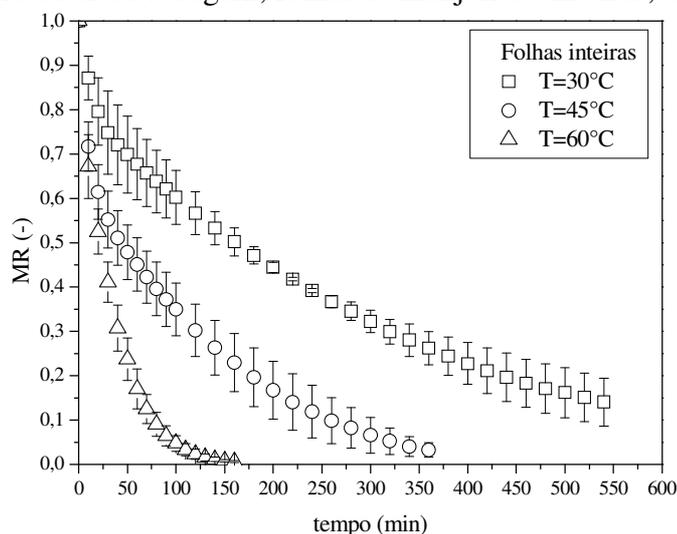
Tabela 4.6 – Parâmetros do modelo de Midilli e Kucuk ajustados para calcular MR das folhas de manjeriço, com os respectivos R^2 , SQR e ERM.

	Ensaio	Réplica I	Réplica II
a	0,978	0,992	1,005
b	$-2,56 \times 10^{-4}$	$-3,49 \times 10^{-4}$	$-3,16 \times 10^{-4}$
n	0,847	0,561	0,337
k	0,008	0,034	0,121
R²	0,999	0,998	0,996
SQR	0,003	0,003	0,005
ERM	3,056	2,564	1,432

Fonte: Acervo pessoal.

Na análise a seguir serão utilizados os valores médios para as réplicas efetuadas, sendo que as barras verticais mostram os desvios-padrões das medidas. Na Figura 4.16 são apresentadas as curvas de cinética de secagem das folhas de manjeriço construídas utilizando os valores médios de MR e parametrizadas na temperatura do ar de secagem.

Figura 4.16 – Adimensional de umidade médio em função do tempo parametrizado na temperatura do ar de secagem; folhas de manjeriço inteiras; $U=0,40\text{m.s}^{-1}$.



Fonte: Acervo pessoal.

Ao se avaliar a influência da temperatura do ar de secagem nas curvas de MR médio em função do tempo, nota-se que o aumento da temperatura provoca uma redução acentuada na umidade das folhas. Mesmo para a estreita faixa de temperaturas investigada, cuja variação em escala absoluta é inferior a 10%, a variação com T observada é superior aos

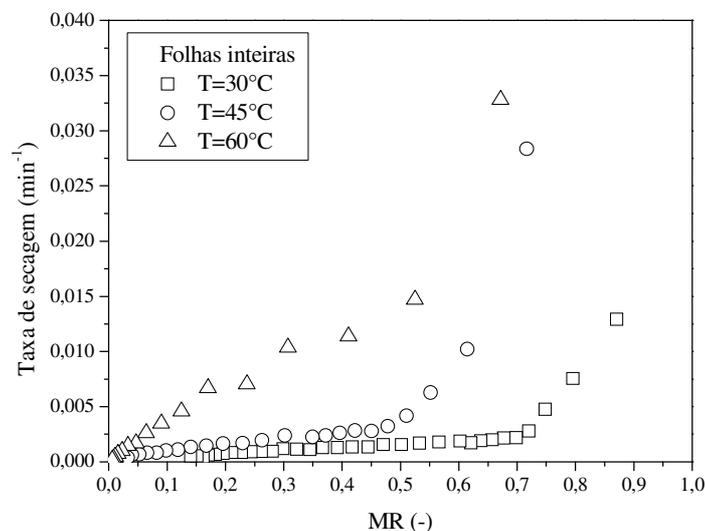
desvios obtidos entre os ensaios. Por exemplo, para a temperatura de 30°C foram despendidos 540 minutos para que o adimensional de umidade médio fosse reduzido de 1,0 para 0,14, enquanto com o uso de T=60°C uma redução semelhante (MR passou de 1,0 para 0,17) foi alcançada num tempo de 60 minutos.

A dependência em relação à temperatura obtida para as folhas neste trabalho apresenta uma variação maior quando se compara uma temperatura à outra. Essa variação é característica de materiais com a razão A_p/V_p grande, como no caso das folhas em que $A_p/V_p=80$. O mesmo acontece na secagem de folhas de papel, em tecidos, etc..

Diversos autores relataram resultados semelhantes aos aqui obtidos e mostraram que a temperatura do ar de secagem é um parâmetro que influencia significativamente a secagem de folhas, como Park, Vohnikova e Brod (2002) e Doymaz (2006) para a secagem de folhas de hortelã e Doymaz, Tugrul e Pala (2006) para a secagem de folhas de endro e salsa.

A Figura 4.17 mostra as curvas de taxa de secagem obtidas para as três diferentes temperaturas de secagem avaliadas. Assim como observado nas curvas de cinética de secagem, é possível perceber o efeito acentuado da temperatura no aumento das taxas de secagem. Na temperatura de 60°C, a taxa de secagem máxima das folhas inteiras foi de 0,033 min^{-1} e para T=30°C, esta taxa foi igual a 0,013 min^{-1} , isto é, a taxa de secagem aumentou por um fator de 2,5 com o aumento da temperatura de 30 para 60°C e, como esperado, essa diferença foi reduzida à medida que MR diminuiu até atingir o teor de umidade de equilíbrio.

Figura 4.17 – Curvas de taxa de secagem em função do adimensional de umidade obtidas na secagem das folhas de manjericão inteiras; $U=0,4\text{m.s}^{-1}$.



Fonte: Acervo pessoal.

Para as temperaturas de 30 e 45 °C observa-se uma região inicial em que as taxas de secagem diminuem com a redução do conteúdo de umidade seguida por uma região, a partir de valores de MR próximos a 0,7 e 0,5, respectivamente, onde as taxas de secagem praticamente não se alteram. Para T=60°C, entretanto, é possível notar uma região inicial onde a taxa de secagem sofre uma variação brusca, seguida por outra região onde as taxas de secagem também variam, embora em menor proporção, o que corrobora o fato de que a dependência das taxas de secagem com o adimensional de umidade (MR) também muda com a temperatura.

4.4.2 Análise da literatura

A abordagem da secagem via camada delgada parte do princípio que o meio é pseudo-homogêneo, que, em princípio, apresenta pouco encolhimento e que há uma boa reprodutibilidade desse meio. Materiais que apresentam um encolhimento significativo necessitam de uma abordagem específica, caso contrário, o estudo terá pouco valor científico e tecnológico. Uma abordagem detalhada sobre esses pontos não foi encontrada na literatura. Nota-se, entretanto, que a própria análise que os autores fazem sobre a reprodutibilidade do meio já é deficiente.

Braga (2002) verificou que boa reprodutibilidade foi obtida em ensaios de secagem de folhas de eucalipto (*Eucalyptus citriodora*) para duas repetições no ponto central (T=70°C, U=6,05 cm.s⁻¹ e t=60 min) do planejamento estatístico utilizado. Dias, Souza e Alsina (2011) analisaram a reprodutibilidade dos ensaios de secagem de folhas de hortelã (*Mentha x vilosa* Hudson) também pela repetição de ensaios no ponto central (T=60°C e U=1,0 m.s⁻¹). Os autores relataram que as curvas de secagem apresentaram boa reprodutibilidade. Contudo, é possível notar para o tempo de 5 minutos, por exemplo, que a umidade variou entre aproximadamente 1,9 (Ensaio 3) e 2,7 (Ensaio), o que corresponde a uma variação maior que 40%.

Tarhan et al. (2010) verificaram a reprodutibilidade de curvas de secagem obtidas para folhas de hortelã-pimenta (*Mentha piperita* L.) em um secador de tambor rotativo. Os autores assumiram a secagem das folhas como sendo equivalente à secagem em camada fina, como consequência do efeito de mistura do tambor e, assim, utilizaram o modelo de Page para representar os dados experimentais obtidos para duas réplicas realizadas em condições de secagem idênticas. O modelo de Page foi considerado adequado para prever os dados do adimensional de umidade em função do tempo baseando-se em indicativos

estatísticos ($R^2 \approx 1,0$ e desvios próximos de zero). Entretanto, diferentes valores foram encontrados para os parâmetros do modelo. O parâmetro k , por exemplo, foi igual a 1,156 para a Réplica I, 12 vezes maior comparado à Réplica II, onde o valor de k foi de 0,095.

Estes trabalhos são representativos de inúmeros outros, o que deixa claro que ainda não se está dando à secagem de folhas em leito fixo a análise que ela necessita. O leito fixo constituído por folhas, que apresentam umidade superior a 80%, tem comportamento diferenciado em sua estrutura o que leva a uma interação muito complexa entre o fluido de secagem e as folhas. Desconhecer este fato leva a que muitos trabalhos já publicados tenham pouca importância, pois os resultados obtidos são inconclusivos tanto para fins acadêmicos como para uso prático.

4.5 Análise da secagem sob diferentes formas de contato

O comportamento dos leitos de folhas quando submetidos a diferentes configurações de escoamento foi avaliado em experimentos de secagem em leitos fixos e camada espessa, em ensaios fluidodinâmicos e de secagem em leitos ‘fluidizados’ com e sem vibração e, por fim, em ensaios de secagem em leitos fixos com escoamento paralelo de ar.

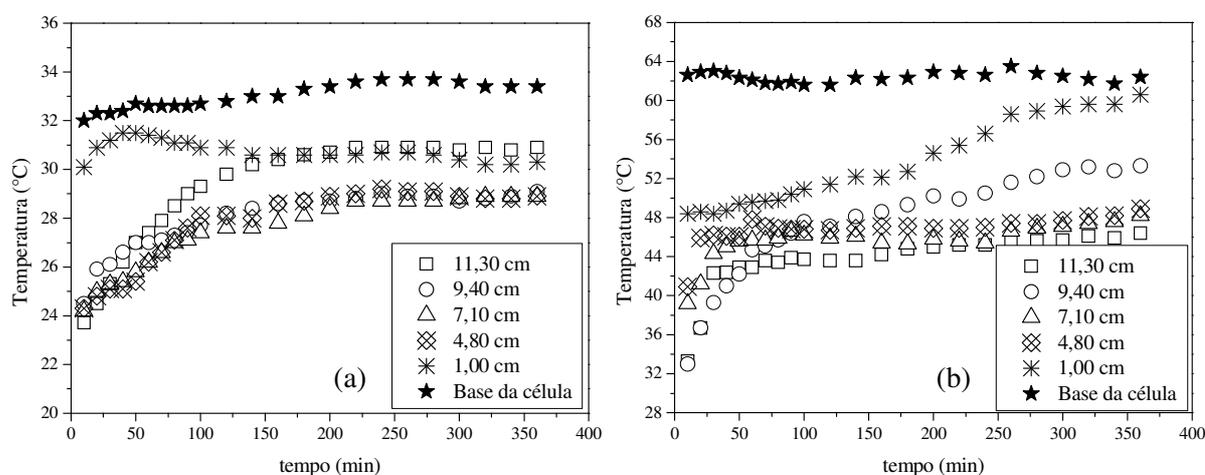
4.5.1 Secagem em leitos espessos

Diferentemente da experimentação em camada fina ou delgada, onde os gradientes axiais de temperatura e umidade são desprezíveis, na secagem em camada espessa estes gradientes são significativos. A presença de gradientes vai, certamente, tornar mais complexos os problemas detectados nas análises em camada fina. Para verificar como os leitos se comportam nesta condição foram obtidos dados de distribuição de temperatura e umidade ao longo da altura de uma célula de secagem constituída por folhas inteiras de manjeriço, nas condições de menor e maior temperatura utilizadas nos ensaios em camada fina, isto é, para $T=30$ e 60°C .

4.5.1.1 Distribuição de temperatura no leito

A Figura 4.18 mostra os gráficos de temperatura em função do tempo de secagem obtidos em diferentes posições axiais do leito de folhas inteiras de manjeriço usando temperaturas de ar iguais a 30°C e 60°C na entrada do leito.

Figura 4.18 – Temperatura do leito de folhas de manjeriço em função do tempo de secagem parametrizado na altura da célula; Folhas inteiras; $U=0,40\text{m.s}^{-1}$: (a) $T=30^\circ\text{C}$ e $R_h=30,3\%$; (b) $T=60^\circ\text{C}$ e $R_h=1,8\%$.



Fonte: Acervo pessoal.

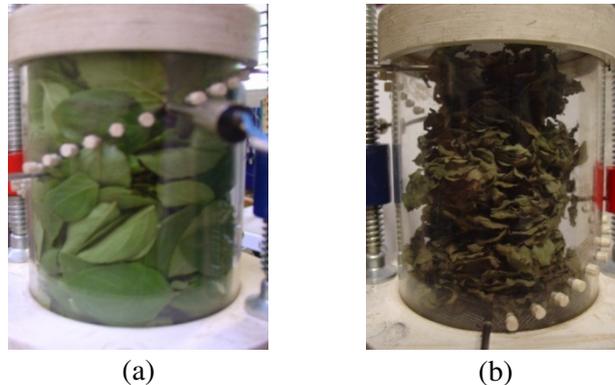
Devido às transferências de calor e massa que ocorrem quando o ar de secagem escoar através do leito, as condições do ar se modificam: a temperatura do ar diminui e sua umidade aumenta em função da altura, provocando a formação de um gradiente de temperatura. Assim, espera-se que as temperaturas sejam maiores na base, diminuindo com o aumento em 'z'.

Entretanto, para $T=30^\circ\text{C}$ (Figura 4.18(a)) é possível notar, de forma geral, que as temperaturas medidas nas diferentes posições axiais ao longo da célula sofreram um aumento inicial até aproximadamente 100 minutos, tendendo em seguida a um valor constante. Para as posições entre 4,80 e 9,40 cm, a temperatura estabilizou em torno de 28°C , enquanto na posição 1,00 cm, próximo à base da célula, ela estabilizou em cerca de 30°C , que é cerca de 2°C abaixo da temperatura medida na base da célula. A pequena queda de temperatura observada ao longo do leito e o fato das temperaturas nas diferentes posições se manterem constantes por um período de aproximadamente 300 minutos de secagem (~5 h) após o aquecimento inicial é um indicativo de que a taxa de remoção de umidade é muito baixa na posição em que está inserido o termopar e que o leito de folhas não está, de fato,

sendo seco. A canalização do ar na região da parede é visualmente perceptível, e ela é intensificada pelo encolhimento significativo, como é possível notar na Figura 4.19 que mostra fotografias da célula de medida durante a secagem das folhas, mas no centro do leito o material continua úmido (ver região pontilhada da Figura 4.20(b)). Observa-se que, após aproximadamente 120 minutos de secagem, a temperatura na posição 11,30 cm é a mesma medida a 1,0 cm da base, próxima da temperatura de entrada. Isto ocorre porque o leito encolhe e depois deste tempo a temperatura registrada nesta posição é a temperatura do ar de secagem.

Os gráficos obtidos com temperatura do ar de secagem de 60°C (Figura 4.18(b)), apesar de terem apresentado gradientes de temperatura mais intensos, também mostraram em todas as posições axiais do leito uma tendência de aumento de T, atingindo um patamar constante em torno de 47°C o que mostra, novamente, que a taxa de remoção de umidade é baixa no centro do leito de folhas. O encolhimento e a formação de canais preferenciais de escoamento, de novo, fizeram com que as temperaturas medidas em algumas condições não fossem as do leito, e sim a do ar de secagem.

Figura 4.19 – Fotografias da célula de medida durante a secagem em camada espessa de folhas inteiras de manjeriço; $T=60^{\circ}\text{C}$; $U=0,4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) 0 minutos e (b) 360 minutos de secagem.



Fonte: Acervo pessoal.

O comportamento dos perfis de temperatura ao longo da célula constituída por folhas inteiras já era esperado. A técnica de medida utilizada, com a inserção de um termopar no centro do leito apresenta bons resultados para leitos homogêneos e que não se deformam consideravelmente quando submetidos ao escoamento do ar e elevadas temperaturas, o que não é o caso dos leitos de folhas, que são altamente heterogêneos. Além do já citado efeito de

parede, a elevada contração de volume do leito e até mesmo a inserção dos termopares na célula de secagem pode desestruturar o leito, agravando sua situação de não homogeneidade.

Como consequência, a secagem não é homogênea. Logo, os dados aqui obtidos não podem ser analisados como os de um meio pseudo-homogêneo. Como mostra a Figura 4.20, que traz fotografias das folhas obtidas após 200 minutos de secagem, as folhas inteiras formam um bloco e um indício de que o ar não percolou o leito de forma homogênea, foi que a umidade no interior do aglomerado de folhas permaneceu elevada (ver região pontilhada da Figura 4.20 (b)).

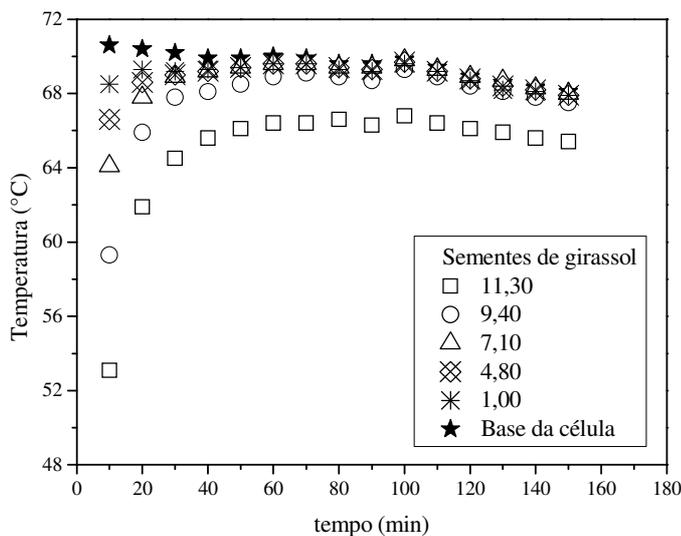
Figura 4.20 – Fotografias dos leitos de folhas inteiras após 200 minutos de secagem; $T=60^{\circ}\text{C}$: (a) aglomerado de folhas e (b) interior do aglomerado de folhas.



Fonte: Acervo pessoal.

Com o intuito de se obter dados que pudessem ser usados como referência para comparação com as folhas, foram realizados ensaios para determinação da distribuição de temperatura em função do tempo de secagem para um leito composto por sementes de girassol (*Helianthus annuus*), e os gráficos obtidos são mostrados na Figura 4.21. Estas sementes possuem $A_{proj}=0,91\text{cm}^2$, $d_m=1,07\text{ cm}$ e razão $A_p/V_p=15$ (LIMA, 2009), e foram escolhidas por formarem leitos rígidos cuja razão $D/d_m=9,0$, superior à encontrada para os leitos de folhas. As sementes foram adquiridas secas ($M=8,80\%$ (b.s.)) e, anteriormente ao seu uso, reumidificadas até umidade igual a $16,17\%$ (b.s.) em ambiente fechado com temperatura e umidade controlada ($30\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $84,0\%$ (b.s.), respectivamente).

Figura 4.21 – Temperatura do leito de sementes de girassol ($m \cong 340,0$ g) em função do tempo de secagem parametrizado na altura da célula de medida; $T=70^\circ\text{C}$; $U=0,40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; $R_h=1,7\%$.



Fonte: Acervo pessoal.

Os gráficos obtidos para as sementes de girassol apresentaram comportamento esperado de um leito pseudo-homogêneo. É possível verificar que quanto mais próxima à base da célula, maior foi o aquecimento inicial das sementes e, com o decorrer do ensaio, o gradiente de temperatura foi gradativamente reduzido até que, num tempo de aproximadamente 60 minutos, as temperaturas das diferentes camadas tornaram-se constantes e iguais à temperatura de entrada do ar no leito. Somente para a maior altura (11,30 cm), a temperatura aumentou até um valor inferior à temperatura do ar na entrada da célula o que, possivelmente, indica que, ao contrário do que foi obtido para o leito de folhas, a secagem em leito fixo com espessura inferior a 9,4 cm possibilitará a produção de sementes com distribuição uniforme de umidade.

Os valores obtidos para as sementes de girassol mostram que não há problemas com a metodologia clássica de secagem. O problema, de fato, é o comportamento durante a secagem de um 'recheio' constituído por folhas.

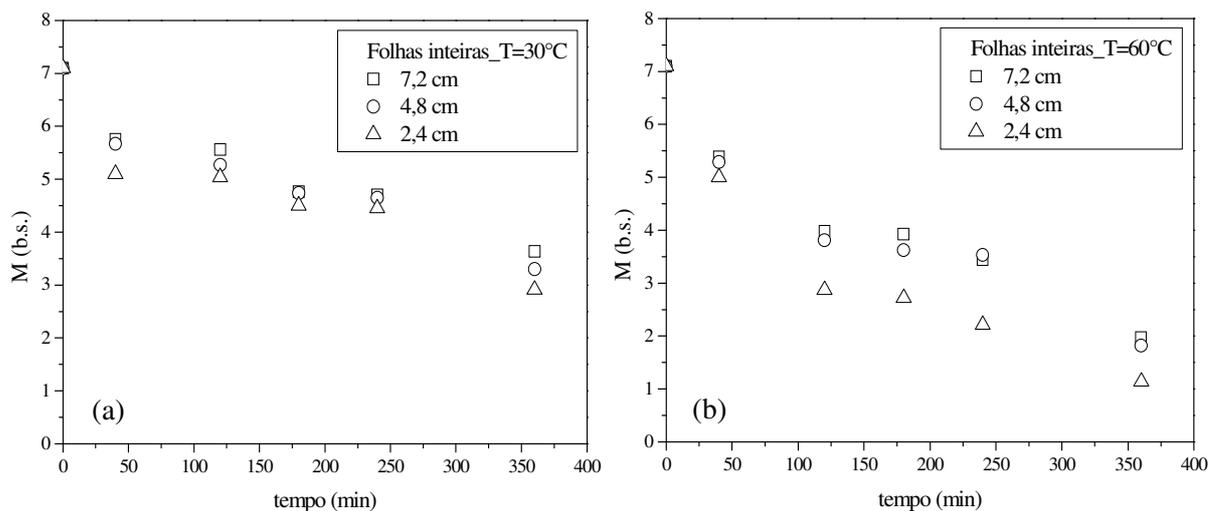
4.5.1.2 Distribuição de umidade no leito

A Figura 4.22 mostra os gráficos de distribuição de umidade em função do tempo de secagem obtidos em diferentes posições axiais de leitos de folhas inteiras de manjeriço e usando temperaturas iguais a 30°C e 60°C . Inicialmente, dois fatos devem ser ressaltados. Em primeiro lugar, ao se observar as fotos mostradas na Figura 4.20 e,

principalmente, as observações visuais durante o processo de secagem, é possível inferir que a umidade das folhas varia radialmente, em razão dos problemas de canalização observados. Assim, embora a técnica utilizada forneça uma medida da umidade média em uma camada do leito cuja altura média é a posição axial indicada, estes valores não representam valores locais e estão sujeitos a uma incerteza considerável. Além disso, com a elevada contração de volume do leito (ver Figura 4.23), a obtenção de valores de umidade média das folhas só foi possível de ser realizada em três das cinco camadas ou subdivisões da célula de secagem.

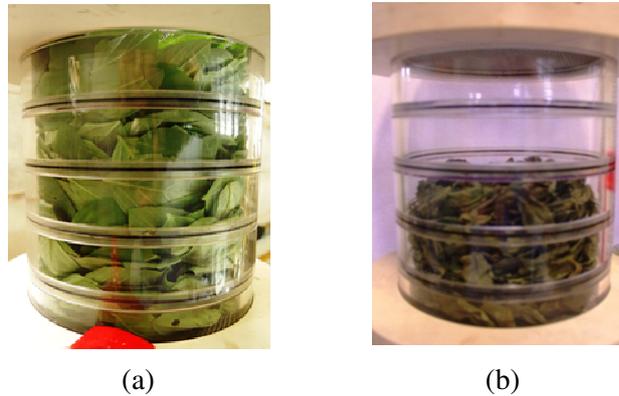
Para $T=30^{\circ}\text{C}$ (Figura 4.22(a)) nota-se, de forma geral, que a redução da umidade é lenta e, assim como encontrado para os valores de temperatura mostrados anteriormente, em que pequenas variações foram obtidas com a posição, ocorre de forma similar em todas as camadas de folhas. Variações quase sempre inferiores a 10% foram observadas na umidade média obtida entre as camadas, exceto para o tempo de 360 minutos, em que essa variação foi próxima a 25%. Além disso, é possível observar que as umidades médias das folhas em todas as camadas permaneceram elevadas ao longo dos 360 minutos de secagem. Para a camada de folhas localizada em $z=7,2$ cm, a redução no conteúdo de umidade não chegou a 50%.

Figura 4.22 – Umidade média do leito de folhas de manjeriço em função do tempo de secagem parametrizado na altura da célula; Folhas inteiras; $U=0,40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) $T=30^{\circ}\text{C}$; (b) $T=60^{\circ}\text{C}$.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4.23 – Fotografias da célula de medida durante a secagem em camada espessa de folhas inteiras de manjeriço; $T=60^{\circ}\text{C}$; $U=0,4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) 0 minutos e (b) 240 minutos de secagem.



Fonte: Acervo pessoal.

Os gráficos de M (b.s.) em função do tempo utilizando temperatura do ar de secagem de 60°C (Figura 4.22 (b)) mostraram uma redução maior e mais rápida no conteúdo de umidade média das folhas. As camadas localizadas em $z=4,8$ e $7,2$ cm apresentaram reduções no conteúdo de umidade similares, com variações inferiores a 9%. A maior redução no conteúdo de umidade ocorreu para a camada de folhas mais próxima à região de entrada do ar de secagem ($z=2,4$ cm). Para esta camada, MR (b.s.) passou de 7,10 para 1,14, o que corresponde a uma redução de 84% no conteúdo de umidade média das folhas.

O comportamento observado para a secagem em camada espessa dos leitos de folhas, onde foram observados gradientes de umidade e altos valores de M (b.s.) mesmo após seis horas de secagem, não havendo uma tendência a um valor constante e igual ao conteúdo de umidade de equilíbrio nas diferentes camadas, pode, de novo, ser atribuído a não homogeneidade dos leitos e ao contato não uniforme do sólido com o ar de secagem, que é agravado com o elevado encolhimento observado.

4.5.2 Secagem em leito ‘fluidizado’

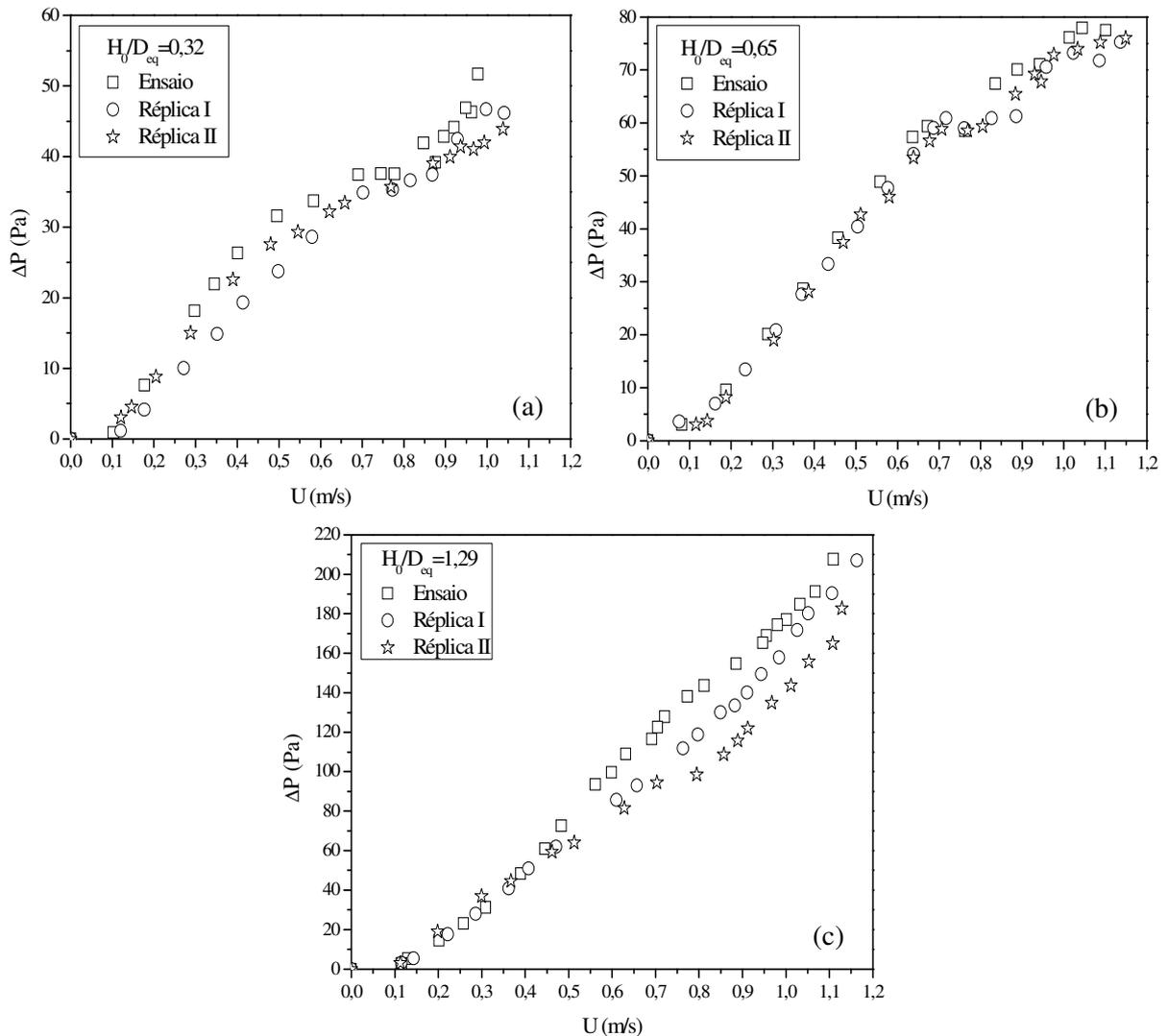
4.5.2.1 Comportamento fluidodinâmico

Os ensaios fluidodinâmicos em leito ‘fluidizado’ foram realizados para as folhas inteiras de manjeriço e a influência da altura do leito estático (H_0) sobre o comportamento fluidodinâmico obtido no leito foi avaliada para razões de altura do leito estático/diâmetro equivalente da câmara de fluidização (H_0/D_{eq}) iguais a 0,32, 0,65 e 1,29. As

curvas de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar obtidas para todas as condições de altura estática investigadas são mostradas na Figura 4.24.

Inicialmente, é possível observar que as réplicas obtidas para as curvas características usando $H_0/D_{eq}=0,32$ e $1,29$ ($H_0=5,0$ e $20,0$ cm, respectivamente) apresentaram elevadas variações, e uma reprodutibilidade ligeiramente superior foi obtida com o uso de $H_0/D_{eq}=0,65$ ($H_0=10,0$ cm). Nota-se que o fato de as curvas fluidodinâmicas terem sido obtidas para velocidades decrescentes de ar, após a expansão inicial do leito, não minimizou de maneira significativa os problemas associados à secagem de folhas, o que, no entanto, já era esperado.

Figura 4.24 – ΔP em função de U ; Folhas de manjerição inteiras: (a) $H_0=5,0$ cm; $\rho_b=0,094$ g.cm⁻³; (b) $H_0=10,0$ cm; $\rho_b=0,086$ g.cm⁻³ e (c) $H_0=20,0$ cm; $\rho_b=0,086$ g.cm⁻³.

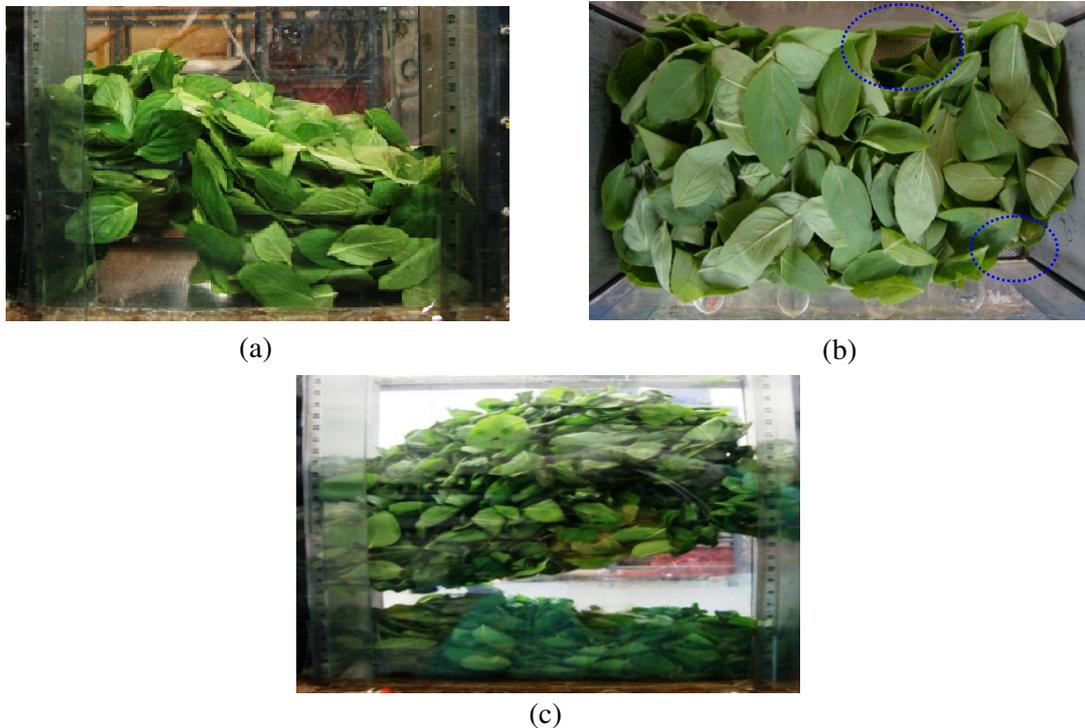


Fonte: Acervo pessoal.

Além disso, as curvas mostradas na Figura 4.24 não apresentaram comportamento característico de fluidização. Para os leitos com folhas de *O. basilicum* com relações H_0/D_{eq} iguais a 0,32 (Figura 4.24(a)) e 0,65 (Figura 4.24(b)), as curvas de ΔP em função de U obtidas apresentam uma região inicial característica de leitos fixos, onde a perda de carga no leito é diretamente proporcional à velocidade superficial de escoamento do ar, seguida por uma região em que a inclinação da curva muda. A partir daí, a queda de pressão continua a aumentar, embora em menor proporção. A mudança na inclinação da reta nas curvas de ΔP versus U indica uma alteração na permeabilidade do leito, ocorrendo uma transição de um leito fixo de menor permeabilidade para um de maior permeabilidade (ou “expandido”). Nas curvas experimentais de ΔP em função de U obtidas para o leito de manjerição com $H_0/D_{eq}=1,29$, outro tipo de comportamento é observado. Como mostra a Figura 4.24(c) não é possível identificar a transição entre os regimes de leito fixo e expandido, pois a queda de pressão aumenta continuamente com o aumento de U do ar, a uma taxa praticamente constante.

A observação visual do leito durante a operação permitiu inferir que estes leitos se mantêm fixos para toda a faixa de U , até a velocidade de elutriação das folhas. Como pode ser visualizado nas fotografias mostradas na Figura 4.25, que ilustram comportamentos típicos obtidos durante os experimentos, além da formação de canais preferenciais de escoamento de ar, os leitos de folhas não apresentam nenhuma característica típica do estado fluidizado, ou seja, não comportam-se como um fluido. Observou-se visualmente que, com o aumento da velocidade de escoamento do ar a partir de zero, em um dado momento, os leitos eram levantados como um ‘bloco’, não ocorrendo uma circulação efetiva das folhas no interior da câmara (ver Figura 4.25(a)). Quando a vazão de ar no leito era reduzida depois da expansão inicial, o agregado de folhas inicialmente suspenso, ‘caía’ e permanecia como um leito fixo praticamente estático. A Figura 4.25(b) mostra uma fotografia do topo do leito ($H_0=10,0$ cm), onde se pode notar ainda a formação de muitos canais preferenciais de escoamento, sobretudo junto às paredes da câmara.

Figura 4.25 – Fotografias do leito ‘fluidizado’ operando com folhas inteiras de manjeriço: (a) $H_0=5,0\text{cm}$; $U=0,73\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $H_0=10,0\text{cm}$; $U=0,80\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (visão de topo) e (c) $H_0=20,0\text{cm}$; $U=1,12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Fonte: Acervo pessoal.

Os comportamentos acima descritos foram similares para todas as condições de H_0/D_{eq} aqui avaliadas, exceto para o leito de folhas com altura $H_0=20\text{ cm}$. Para este, foi possível observar que, quando a velocidade do fluido começa a ser diminuída, forma-se um “bolsão” de ar que divide o leito em dois (Figura 4.25(c)). Isto ocorre porque o fluido não consegue percolar todo o leito de folhas e, assim, o gás fica retido no interior da coluna. Este comportamento foi observado em dois dos três ensaios realizados com $H_0=20\text{ cm}$.

Tanto os gráficos da Figura 4.24, como as fotografias da Figura 4.25, mostram que, nas condições de realização dos experimentos, não houve em nenhum momento um estado de fluidização no leito. Assim, muito cuidado deve ser tomado ao se referir à secagem de folhas em leitos fluidizados.

4.5.2.2 Secagem

Para avaliar como as dificuldades acima discutidas vão se refletir na secagem, escolheu-se uma condição entre as testadas e efetuou-se a secagem do material fazendo-se uma avaliação do teor de umidade em diferentes posições do leito e para diferentes tempos de

secagem. A Tabela 4.7 traz os valores de umidade média das folhas no leito obtidos para ensaios realizados na faixa de regime ‘expandido’, utilizando H_0/D_{eq} igual a 0,65 e diferentes tempos de secagem. Os valores de umidade média foram calculados como sendo a média aritmética das umidades das amostras coletadas nos 12 pontos de amostragem do leito, conforme esquematizado na Figura 3.14.

Com base nos valores de desvios padrão é possível perceber que a redução de umidade no leito ocorreu de forma homogênea até aproximadamente 6 horas de secagem. Entretanto, nota-se que o decréscimo no teor de umidade das folhas foi pequeno, reduzindo de um valor inicial $M_i=7,55$ (b.s.) (umidade das folhas *in natura*) para 4,26 e 2,67 (b.s.), com 2 e 6 horas de secagem, respectivamente.

Tabela 4.7 – Valor médio da umidade das folhas no leito medidas em 12 pontos de amostragem e respectivos desvios padrão; $T=45^\circ\text{C}$; $U=1,0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; R_h médio=73%; $M_i=7,55$ (b.s.).

Ensaio	t (h)	Umidade média (b.s.) em decimal	Desvio padrão relativo
1	2	$4,26 \pm 0,29$	0,07
2	6	$2,67 \pm 0,45$	0,17
3	8	$1,04 \pm 0,48$	0,46
4	10	$0,96 \pm 0,41$	0,43
5	14	$1,00 \pm 0,44$	0,44

Fonte: Acervo pessoal.

Para tempos de secagem superiores a 6 horas, os desvios obtidos entre as umidades das amostras nos diferentes pontos de amostragem foram maiores, indicando uma redução da homogeneidade de secagem das folhas. Além disso, para os tempos de secagem de 8, 10 e 14 horas é possível notar uma redução similar da umidade média das folhas: M passou de $M_i=7,55$ (b.s.) para valores em torno de 1,00 (b.s.).

Durante o processo de secagem foi possível observar que as folhas ficam aglomeradas, não ocorrendo uma circulação efetiva de ‘partículas’ no interior da câmara. Além disso, com a redução da umidade ocorre a intensificação dos canais preferenciais de escoamento do ar, principalmente próximo às paredes da câmara. Isto pode ser visualizado na Figura 4.26, que mostra fotografias do topo do leito obtidas durante os experimentos no tempo inicial e após 3 e 8 horas de secagem. Este comportamento explica o fato de que, a partir de um determinado tempo de secagem, as folhas não apresentam redução do seu conteúdo de umidade: a secagem tende a ocorrer prioritariamente nas superfícies laterais do

aglomerado e as folhas localizadas no interior deste permanecem com teores de umidade elevados.

Figura 4.26 – Fotografias do leito de folhas de manjeriço durante o processo de secagem em tempos de secagem iguais a (a) 0 horas; (b) 3 horas e (c) 8 horas.



Fonte: Acervo pessoal.

Os resultados indicam que a secagem do leito de folhas de manjeriço ($H_0=10$ cm) não é homogênea e a umidade média obtida no leito se mantém muito acima da umidade de equilíbrio para este material, mesmo para tempos de operação longos. Nos ensaios de desorção de umidade para as folhas de manjeriço, a umidade de equilíbrio obtida com o uso de $T=45^\circ\text{C}$ e umidade relativa de 74,5% foi igual a 0,23 (b.s.), valor muito inferior aos obtidos nos experimentos de secagem aqui realizados.

4.5.3 Secagem em leito ‘vibro-aerado’

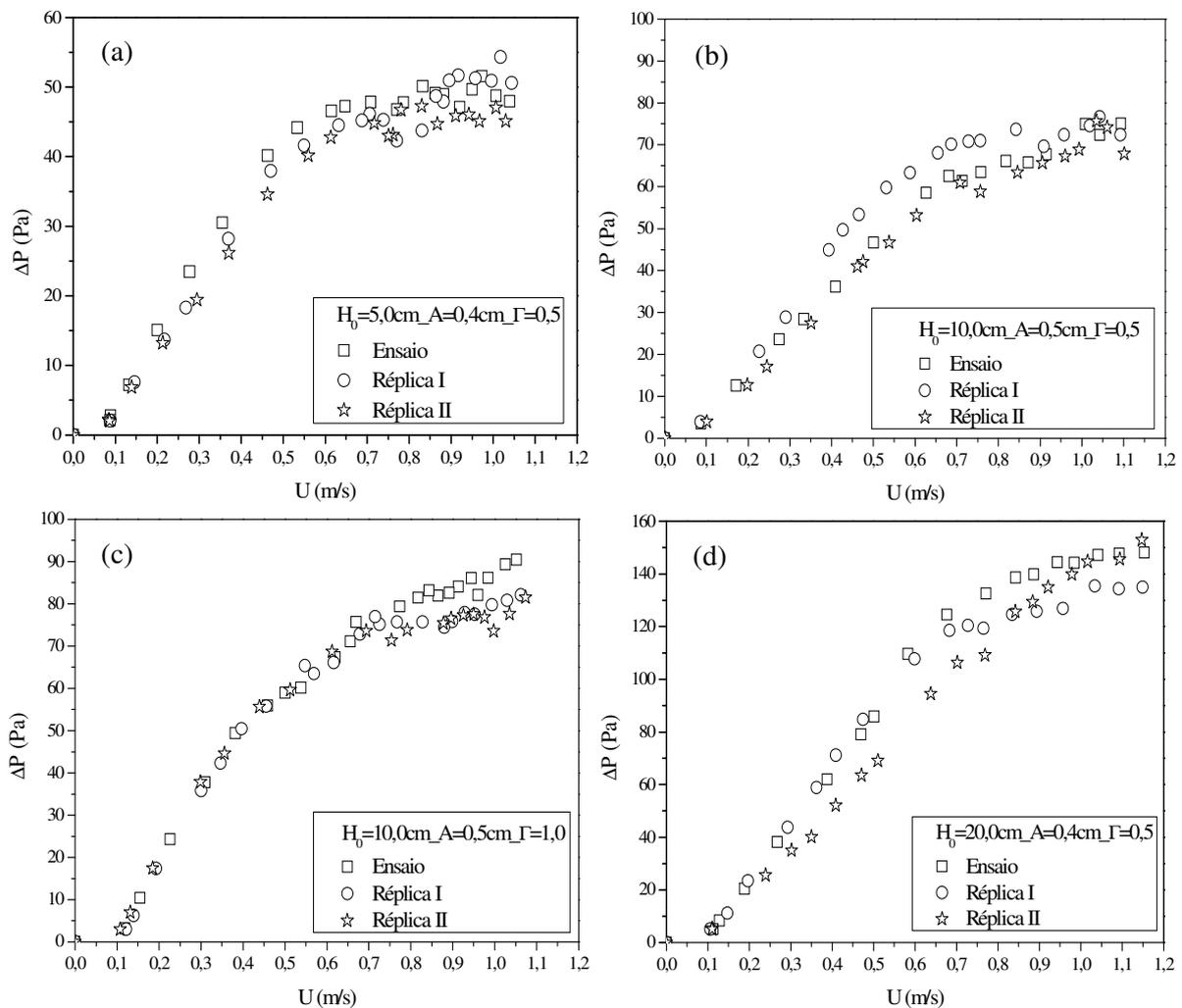
4.5.3.1 Comportamento fluidodinâmico

O uso de vibração em um leito é, frequentemente, recomendado com o intuito de proporcionar uma mistura mais uniforme entre as fases sólida e fluida para materiais que tendem a aglomerar. Para testar se a vibração é uma opção para melhorar a secagem de folhas, avaliou-se a secagem em leito vibrado com aeração. O comportamento fluidodinâmico foi, inicialmente, avaliado para razões H_0/D_{eq} iguais a 0,32, 0,65 e 1,29, e adimensionais de vibração (Γ) iguais a 0,5 e 1,0 foram testados para duas diferentes amplitudes vibracionais: 0,4 e 0,5 cm. Escolheu-se operar com valores de Γ abaixo de 1,0, pois, nesta região, o efeito da aceleração média vibracional exercida sobre o sistema não supera o efeito da gravidade

(ver Equação (16)) e o objetivo aqui é apenas promover a agitação necessária para evitar a aglomeração das folhas permitindo que o ar percole através do leito.

A reprodutibilidade das curvas de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar foi avaliada para todas as condições de operação investigadas. Nota-se que a reprodutibilidade das curvas não é boa, independente das condições de operação, como mostra a Figura 4.27. Por motivos de concisão, as demais curvas são apresentadas no Apêndice (Figuras A.1 a A.8).

Figura 4.27 – Leito ‘vibro-aerado’; Queda de pressão no leito em função de U ; Folhas inteiras de manjericão: (a) $H_0=5,0\text{cm}$; $A=4,0 \times 10^{-3}\text{m}$; $\Gamma=0,5$; (b) $H_0=10,0\text{cm}$; $A=5,0 \times 10^{-3}\text{m}$; $\Gamma=0,5$; (c) $H_0=10,0\text{cm}$; $A=5,0 \times 10^{-3}\text{m}$; $\Gamma=1,0$ e (d) $H_0=20,0\text{cm}$; $A=4,0 \times 10^{-3}\text{m}$; $\Gamma=0,5$.

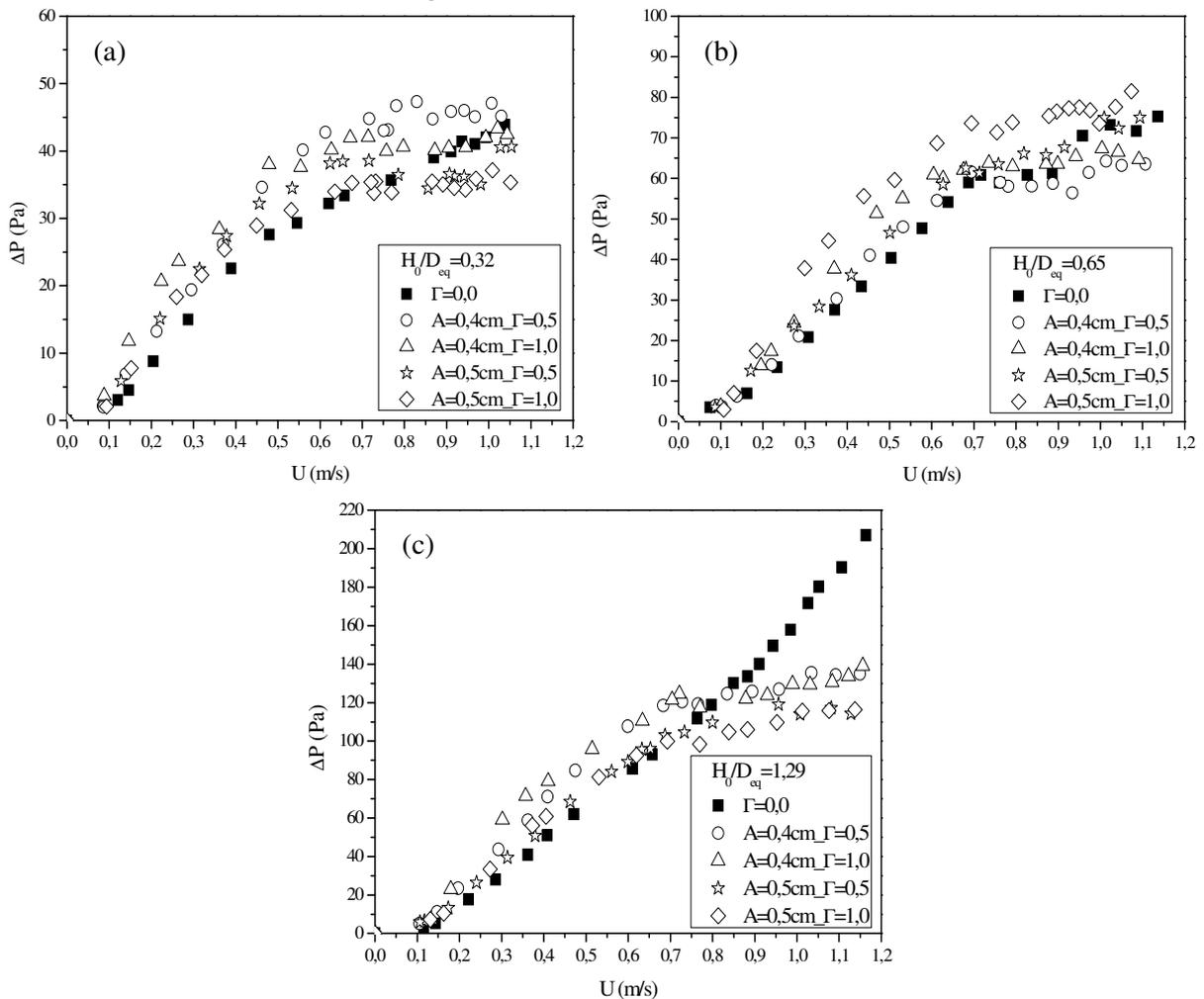


Fonte: Acervo pessoal.

Os valores médios de ΔP obtidos nas tréplicas foram utilizados para avaliar os efeitos da vibração nas curvas obtidas para os leitos de folhas. A Figura 4.28 traz as curvas de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar obtidas para os leitos vibrados

com aeração para valores de H_0 iguais a 5,0 cm (Figura 4.28(a)), 10,0 cm (Figura 4.28(b)) e 20,0 cm (Figura 4.28(c)). É possível notar, que independente da relação H_0/D_{eq} utilizada, os efeitos da vibração na queda de pressão do leito foram bastante significativos na região de leito fixo, onde os valores de ΔP foram sempre maiores devido, possivelmente, à diminuição da ocorrência de canais preferenciais observados nos ensaios com $\Gamma=0,0$.

Figura 4.28 – Leito ‘vibro-aerado’; Queda de pressão no leito em função de U parametrizado em Γ ; Folhas inteiras de manjeriço: (a) $H_0=5,0\text{cm}$; (b) $H_0=10,0\text{cm}$ e (c) $H_0=20,0\text{cm}$.



Fonte: Acervo pessoal.

Na região de leito expandido, o uso de vibração minimizou a tendência de crescimento de ΔP com U e, como pode ser visto na Figura 4.28(c), para o leito de folhas com $H_0=20,0$ cm, a vibração permitiu a obtenção de um ponto de transição entre os regimes de leito fixo e ‘expandido’, e a queda de pressão permaneceu praticamente constante com o aumento da velocidade superficial do ar a partir de $U \cong 0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Entretanto, não foi possível identificar efeitos claros da vibração na queda de pressão obtida na região de leito

‘expandido’. Por exemplo, para os leitos com $H_0=5,0$ cm, o uso de amplitude vibracional igual a 0,4 cm levou a maiores quedas de pressão no leito, enquanto que para os leitos com $H_0=10,0$ cm, maiores quedas de pressão foram conseguidas com o uso de $A=0,5$ cm.

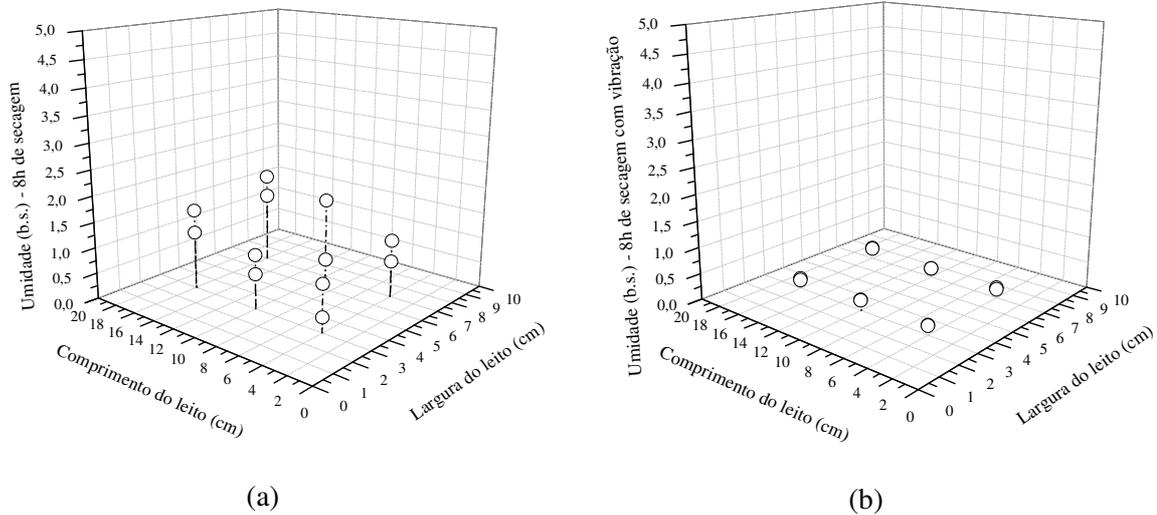
Visualmente foi possível notar que a introdução de vibração no leito não melhorou de forma significativa a ‘qualidade da fluidização’, mas minimizou a ocorrência de canais preferenciais de escoamento de ar e regiões de vazios, e movimentou as folhas de forma mais efetiva. Para o leito com $H_0=20,0$ cm, o uso de vibração evitou a separação do leito observada com o uso de $\Gamma=0,0$ (ver Figura 4.25(c)).

4.5.3.2 Secagem

Com o intuito de verificar a influência da vibração na secagem das folhas, um ensaio foi realizado introduzindo a vibração no leito no início do processo. Os valores de H_0 , temperatura e velocidade do ar de secagem foram similares aos utilizados anteriormente nos ensaios com $\Gamma=0,0$ (item 4.5.2.2), e a umidade relativa do ar medida com o uso de um higrômetro foi em torno de 70%. No experimento realizado utilizou-se $\Gamma=1,0$ e amplitude vibracional (A) igual a 0,5 cm. As umidades das amostras de folhas coletadas nos 12 pontos de amostragem foram determinadas após 8 horas de secagem e os valores obtidos foram utilizados para a construção do gráfico apresentado na Figura 4.29, que mostra um comparativo entre o gráfico obtido para o ensaio de secagem com o uso de $\Gamma=0,0$ (Figura 4.29(a)) e utilizando $\Gamma=1,0$ e $A=0,5$ cm (Figura 4.29(b)). É possível observar que os valores de umidade obtidos para as folhas nas diferentes regiões da câmara de secagem foram similares, sendo a umidade média obtida no leito igual a $0,19\pm 0,02$ (b.s.). Este valor está de acordo com a umidade de equilíbrio estimada para as mesmas condições de temperatura e umidade relativa do ar de secagem utilizadas na operação de secagem.

A observação visual do leito durante a operação mostrou que a vibração melhorou o contato gás-partículas e resultou na secagem uniforme do material. A Figura 4.30 mostra uma fotografia do topo do leito no tempo $t=8$ horas, onde se pode perceber que a introdução de agitação mecânica ao leito durante a secagem permitiu a obtenção de um produto final seco homogeneamente, diferentemente do produto obtido na secagem das folhas com ausência de vibração e para um mesmo tempo de secagem (ver Figura 4.26(c)).

Figura 4.29 – Gráficos de dispersão com os valores de umidade obtidos nos diferentes pontos de amostragem em função do comprimento e largura do leito; $t=8$ horas de secagem: (a) $\Gamma=0,0$ e (b) $\Gamma=1,0$; $A=5,0 \times 10^{-3} \text{m}$.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 4.30 – Fotografia do leito de folhas de manjeriço a final da secagem ($t=8$ horas) utilizando vibração desde $t=0$ hora.

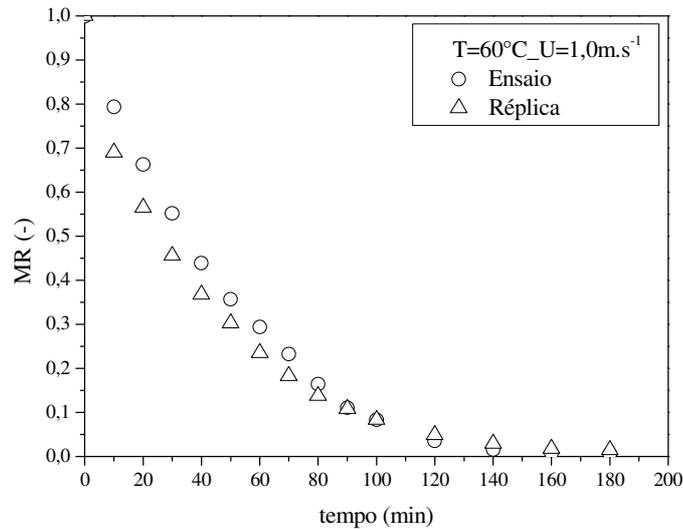


Fonte: Acervo pessoal.

4.5.4 Secagem em leito fixo com escoamento de ar paralelo ao leito de folhas

A Figura 4.31 mostra os gráficos de cinética de secagem obtidos durante a secagem de folhas inteiras de manjeriço em um secador convectivo com escoamento de ar paralelo à amostra e utilizando $T=60^{\circ}\text{C}$ e velocidade superficial do ar igual a $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. É possível notar que a modificação na configuração do escoamento de ar não melhorou de forma significativa a reprodutibilidade das curvas de MR em função do tempo de secagem, e variações de até 60% nos valores de MR foram observadas entre o ensaio e sua réplica.

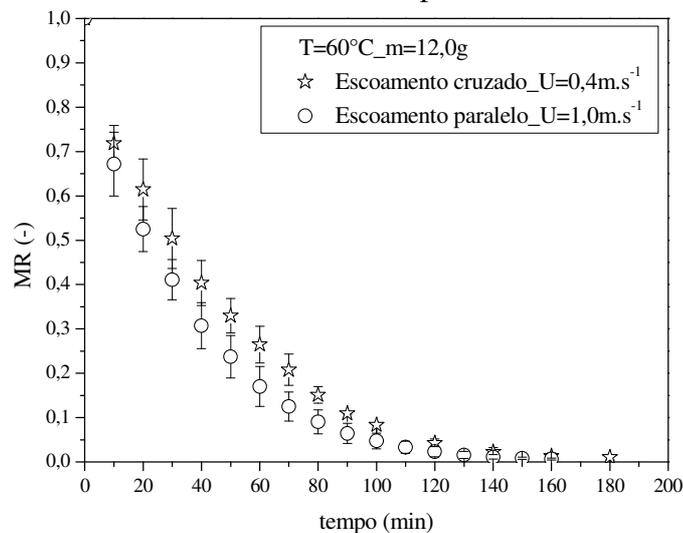
Figura 4.31 – Adimensional de umidade em função do tempo para a secagem de folhas inteiras de manjeriço em leito fixo com escoamento de ar paralelo; $T=60^{\circ}\text{C}$; $U=1,0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Fonte: Acervo pessoal.

Além disso, como mostra a Figura 4.32, as curvas de MR em função do tempo de secagem foram similares para as diferentes formas de contato sólido-fluido: secagem com escoamento cruzado e paralelo à amostra, e isto se deve ao contato não eficiente entre o ar de secagem e as folhas. Este contato é ainda prejudicado pelo forte encolhimento do material observado durante a secagem. Como consequência, a modificação do escoamento não apresenta efeito significativo na cinética de secagem obtida para leitos formados por folhas.

Figura 4.32 – Adimensional de umidade em função do tempo para a secagem de folhas inteiras com escoamento cruzado e paralelo ao leito; $T=60^{\circ}\text{C}$.



Fonte: Acervo pessoal.

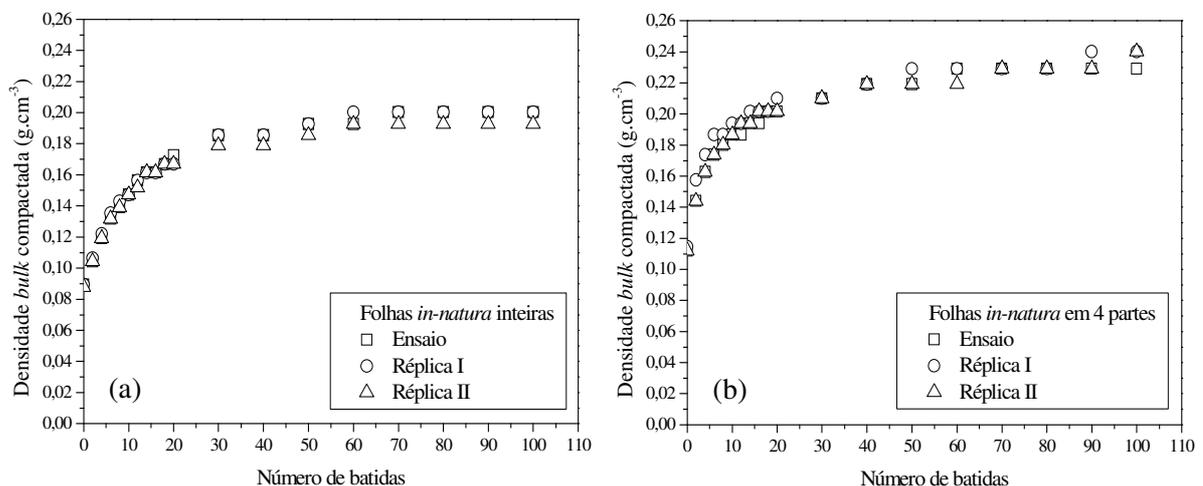
4.6 Análise da secagem de folhas associada à razão D/d_m

4.6.1 Densidade *bulk*

A densidade *bulk* é uma das propriedades que pode ser utilizada para caracterizar um meio poroso. Esta propriedade relaciona a massa de um conjunto de partículas com o volume ocupado por elas (Equação (43)), fornecendo, portanto, uma ideia da compactação do leito. Neste trabalho, a definição de valor médio, que pressupõe que o material está distribuído de forma aleatória e uniforme no interior do leito, foi utilizada e empregou-se o procedimento descrito no item 3.1.2 para avaliar como a densidade *bulk* média de leitos constituídos por folhas de manjeriço em diferentes tamanhos e teores de umidade varia em função do empacotamento (número de batidas).

A Figura 4.33 mostra os gráficos de densidade *bulk* como uma função do número de batidas para os leitos constituídos por folhas de manjeriço *in-natura* em dois diferentes tamanhos: folhas inteiras (Figura 4.33(a)) e cortadas em quatro partes (Figura 4.33(b)). É possível observar que o procedimento utilizado no empacotamento dos leitos resultou em valores reproduzíveis de densidade *bulk* média entre os diferentes ensaios. Nas curvas mostradas na Figura 4.33, que são representativas das obtidas para as demais condições investigadas, as diferenças entre as réplicas foram inferiores a 10%. Lembramos que os leitos formados por folhas são heterogêneos e os valores médios de densidade *bulk* obtidos podem não ser representativos para todo o meio, podendo variar localmente de forma significativa.

Figura 4.33 – Gráficos de densidade *bulk* compactada em função do número de batidas para folhas de manjeriço *in-natura*: (a) inteiras e (b) em 4 partes.



Fonte: Acervo pessoal.

Os valores médios obtidos para as densidades *bulk* solta e compactada dos leitos formados por folhas nos diferentes tamanhos (inteiras, cortadas em duas e em quatro partes) e para diferentes teores de umidade, assim como a relação entre a densidade *bulk* solta e compactada para cada condição avaliada, são apresentadas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Valores médios de densidade *bulk* solta e compactada, e respectivos desvios padrão para folhas de manjeriço com diferentes comprimentos e teores de umidade.

Folhas	M (b.u.)	ρ_{bulk} 'solta' (g.cm ⁻³)	ρ_{bulk} 'compactada' (g.cm ⁻³)	Razão
Inteiras	86%	0,089±0,001	0,198±0,004	2,22
	81%	0,093±0,000	0,194±0,000	2,09
	71%	0,077±0,000	0,137±0,004	1,78
	12%	0,018±0,000	0,027±0,000	1,50
Em 2 partes	86%	0,093±0,000	0,207±0,005	2,23
	78%	0,101±0,001	0,206±0,000	2,04
	71%	0,088±0,002	0,159±0,000	1,81
	8%	0,023±0,000	0,033±0,000	1,43
Em 4 partes	86%	0,113±0,001	0,236±0,006	2,09
	77%	0,102±0,000	0,204±0,000	2,00
	62%	0,063±0,001	0,107±0,000	1,70
	9%	0,024±0,000	0,034±0,001	1,42

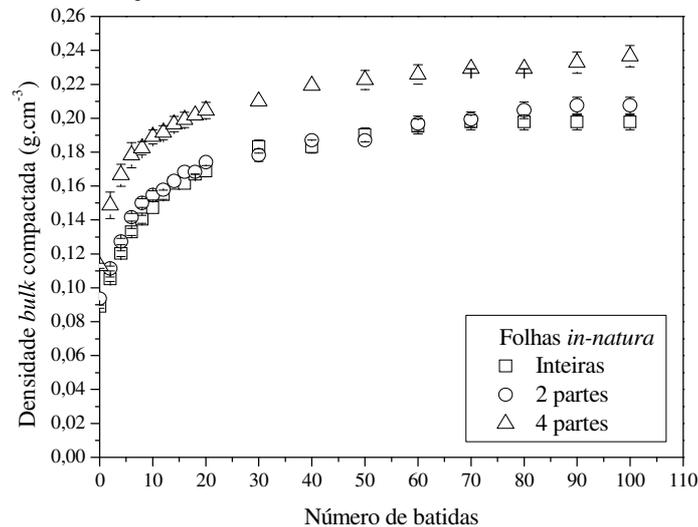
Fonte: Acervo pessoal.

É possível notar que os valores de densidade *bulk* média para os leitos com folhas *in-natura* cortadas em quatro partes foram sempre superiores aos valores obtidos para os leitos com folhas inteiras e cortadas em duas partes. Para estes dois últimos, observa-se que os valores de ρ_b não diferem significativamente, como ilustra a Figura 4.34, que mostra o efeito do tamanho das folhas na densidade *bulk* média obtida nos leitos.

Para a densidade *bulk* solta, o valor obtido para o leito com folhas cortadas em quatro partes (0,113 g.cm⁻³) foi cerca de 30% maior que o obtido para o leito com folhas inteiras (0,089 g.cm⁻³). Esta diferença é gradualmente reduzida com o aumento do número de batidas e para os valores de densidade *bulk* compactada, ρ_b para o leito de folhas em quatro partes (0,236 g.cm⁻³) torna-se somente 19% maior que o valor obtido para o leito de folhas inteiras (0,198 g.cm⁻³). Os valores mais altos de ρ_b encontrados para os leitos constituídos por folhas cortadas em quatro partes indicam que uma maior compactação foi atingida nestes

leitos. Leitos mais compactados oferecem uma maior resistência ao escoamento do ar fazendo com que o fluido perca mais energia e pressão ao escoar através do leito.

Figura 4.34 – Densidade *bulk* média como uma função do n° de batidas para folhas de manjerição *in-natura* de diferentes tamanhos.



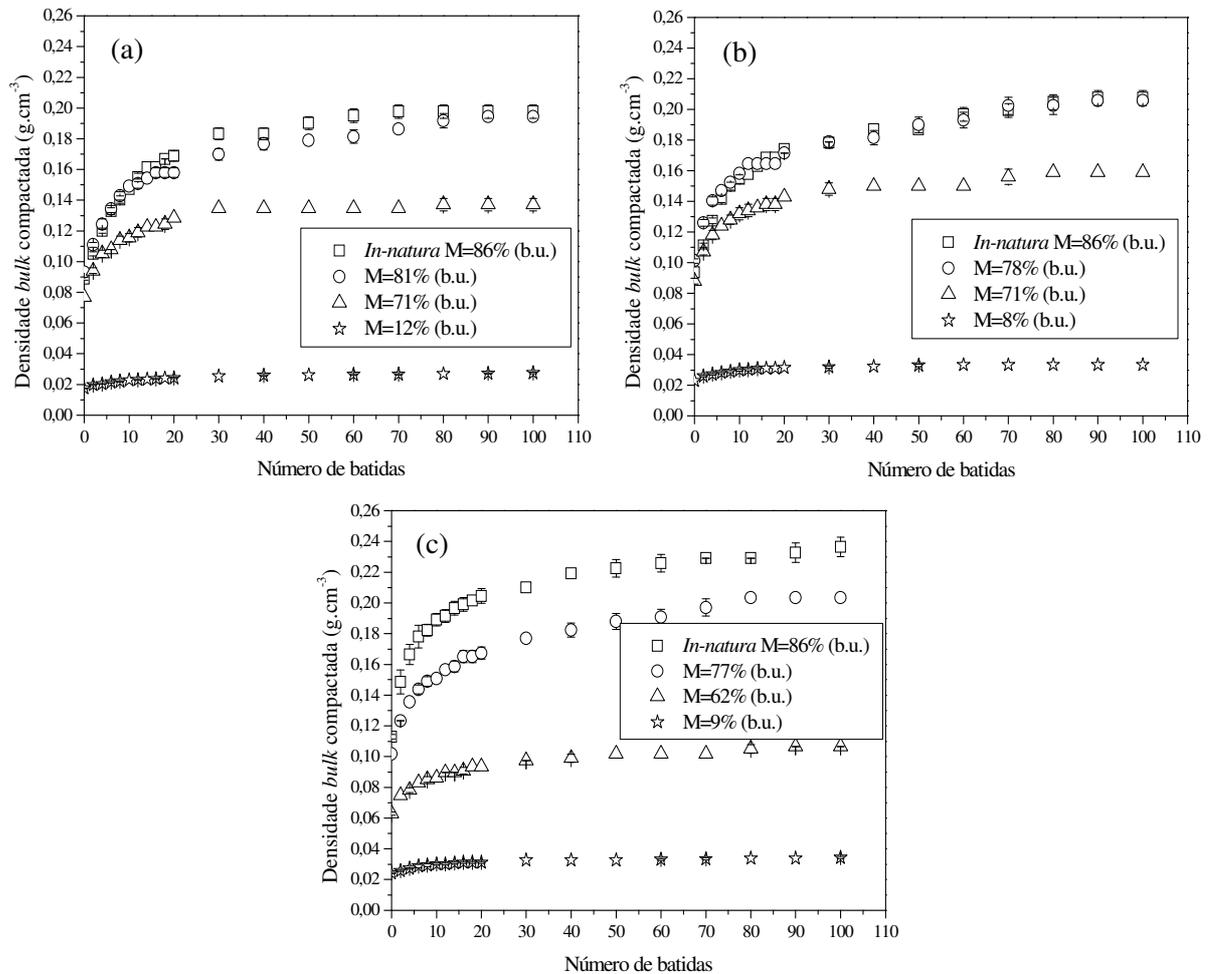
Fonte: Acervo pessoal.

É possível notar ainda que, independente do tamanho das folhas, um mínimo de 70 batidas foi necessário para que os leitos atingissem um volume constante. Além disso, os valores encontrados para a razão ρ_b compactada/ ρ_b solta para as folhas *in-natura* foram bastante elevados: 2,22 para as folhas inteiras, 2,23 para as folhas cortadas em 2 partes e 2,09 para as folhas cortadas em 4 partes. Estes valores são superiores aos encontrados para pós coesivos, cujos valores de ρ_b compactada/ ρ_b solta são superiores a 1,4 (ABDULLAH; GELDART, 1999) e isto está, possivelmente, relacionado ao fato de que as folhas *in-natura* tendem a aglomerar devido ao elevado teor de umidade e grande área de contato interfacial.

A Figura 4.35 mostra os gráficos de densidade *bulk* parametrizados no teor de umidade das folhas para os diferentes tamanhos aqui analisados. Nota-se, de forma geral, que a densidade *bulk* média diminui bastante com a redução do conteúdo de umidade das folhas. Para as folhas inteiras, por exemplo, ρ_b solta diminui de 0,089 g.cm⁻³ para 0,018 g.cm⁻³ e ρ_b compactada passa de 0,198 g.cm⁻³ para 0,027 g.cm⁻³, ou seja, as densidades *bulk* reduzem em aproximadamente 80% e 86%, respectivamente, quando o conteúdo de umidade das folhas é reduzido de 86 para 12% (b.u.). Reduções elevadas são também obtidas para as folhas cortadas. Para as folhas em 4 partes, por exemplo, variações de 79% e 86% são obtidas nos

valores de densidade *bulk* solta e compactada, respectivamente, quando o teor de umidade é reduzido de 86 para 9% (b.u.).

Figura 4.35 – Densidade *bulk* média em função do n° de batidas para folhas de manjeriço com diferentes teores de umidade: (a) folhas inteiras; (b) cortadas em 2 partes e (c) cortadas em 4 partes.



Fonte: Acervo pessoal.

É possível observar ainda que, com a diminuição de M (b.u.) das folhas, os valores obtidos para a razão ρ_b compactada/ ρ_b solta diminuem de maneira significativa. Para as folhas inteiras, esta razão diminui de 2,22 para 1,50 e para as folhas em 4 partes passam de 2,09 para 1,42. As folhas, quando secas, perdem a capacidade de se deformar facilmente quando comprimidas, e diminuem também as forças adesivas associadas à umidade, reduzindo a tendência de aglomeração observada em ensaios com folhas *in-natura*. Além disso, as folhas encolhem com a redução da umidade e maiores razões D/d_m são esperadas, diminuindo o efeito de parede. Assim, a diminuição dos valores de ρ_b compactada/ ρ_b solta

está, possivelmente, relacionada a estes fatores. Esses resultados mostram claramente que, assim como o tamanho das folhas e o método de empacotamento no leito, a redução de umidade provoca alterações significativas nas características do ‘pacote’ de folhas.

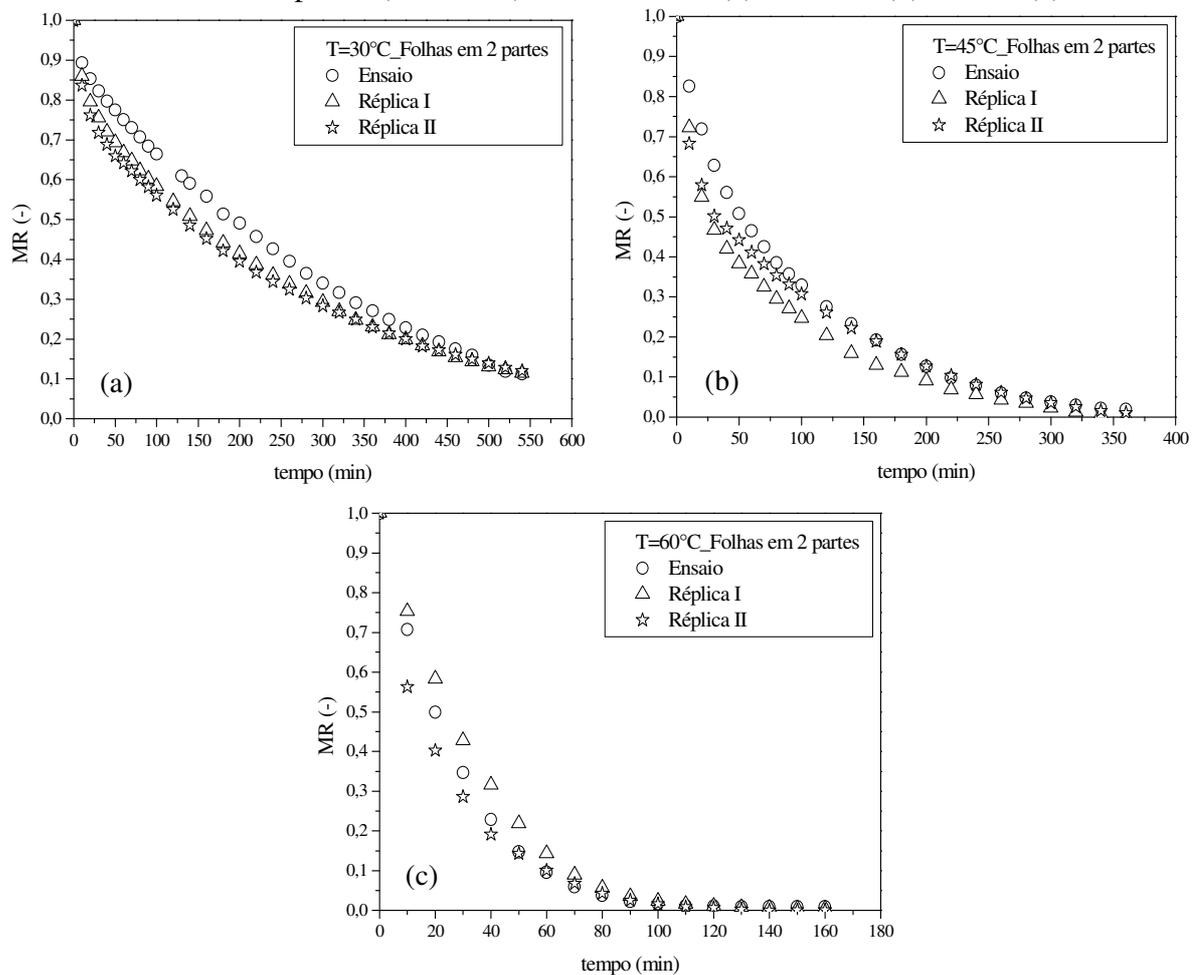
4.6.2 Secagem em camada fina

No item 4.4.1 foi apresentada uma análise da secagem em camada fina de folhas de manjeriço inteiras. Para estas, cuja razão entre o diâmetro da célula de secagem e o diâmetro médio da folha era $D/d_m=4,2$, as curvas de MR em função do tempo não foram reprodutíveis para os ensaios realizados em diferentes condições de temperatura (30, 45 e 60°C) e usando $U=0,4 \text{ m.s}^{-1}$. A análise apresentada no item 4.6.1, por sua vez, mostrou que a densidade *bulk* dos leitos de folhas tende a aumentar quando o tamanho da folha é reduzido, particularmente quando se comparam as folhas inteiras com as folhas cortadas em quatro.

Neste item, será apresentada uma análise da secagem em camada fina associada à razão D/d_m . Os resultados obtidos para as folhas inteiras serão comparados com os encontrados na secagem de folhas cortadas em duas ($D/d_m=5,3$) e em quatro partes ($D/d_m=7,8$) utilizando condições similares de temperatura e velocidade do ar de secagem aos utilizados nos ensaios para folhas inteiras. Além disto, utilizou-se sempre a mesma massa de material e procedimentos idênticos para inserção das folhas no interior da célula de secagem.

Os gráficos do adimensional de umidade em função do tempo de secagem obtidos para as folhas cortadas em duas e em quatro partes são mostrados, respectivamente, na Figura 4.36 e Figura 4.37. É possível notar, que independente da razão D/d_m utilizada, a reprodutibilidade dos ensaios continua sendo ruim em todas as condições de temperatura avaliadas.

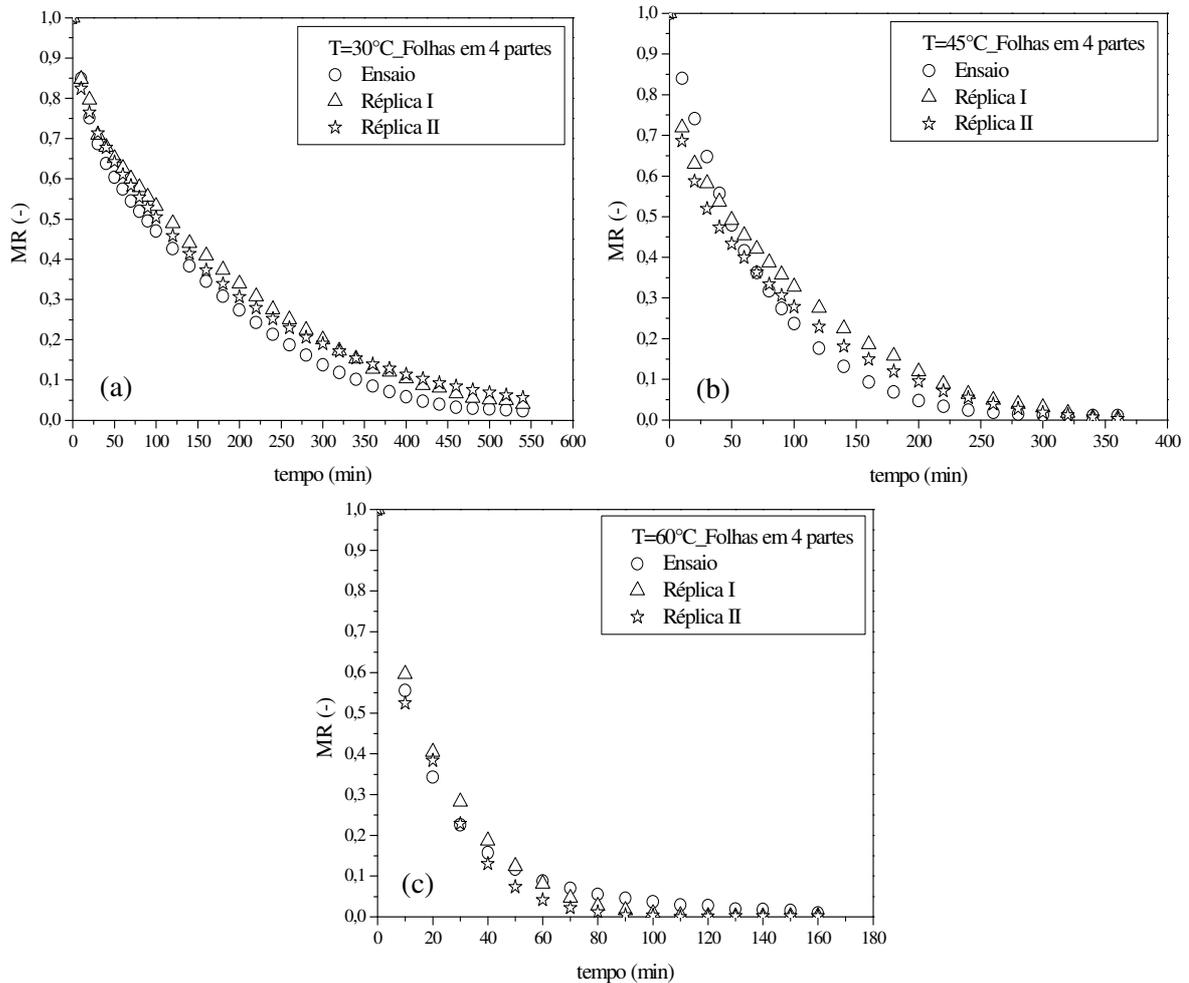
Figura 4.36 – Adimensional de umidade em função do tempo para as folhas de manjeriço cortadas em duas partes ($D/d_m=5,3$); $U=0,40\text{m.s}^{-1}$: (a) $T=30^\circ\text{C}$; (b) 45°C e (c) 60°C .



Fonte: Acervo pessoal.

Se tomarmos, por exemplo, nas curvas de secagem para $D/d_m=5,3$ e $T=60^\circ\text{C}$ (Figura 4.36(c)) os valores de MR para um tempo de 40 minutos, observamos que MR variou entre 0,19 (Réplica II) e 0,32 (Réplica I). Nas curvas de secagem obtidas para $D/d_m=7,8$ e $T=60^\circ\text{C}$ (Figura 4.37(c)) é possível notar que o adimensional de umidade variou de 0,04 (Réplica II) a 0,09 (Ensaio) no tempo de 60 minutos. Essas variações que chegam a 125%, novamente, não podem ser consideradas desprezíveis e o aumento da relação D/d_m de 4,2 para 7,8 não melhorou a reprodutibilidade obtida nos ensaios com folhas.

Figura 4.37 – Adimensional de umidade em função do tempo para as folhas de manjeriço cortadas em quatro partes ($D/d_m=7,8$); $U=0,40\text{m.s}^{-1}$: (a) $T=30^\circ\text{C}$; (b) 45°C e (c) 60°C .



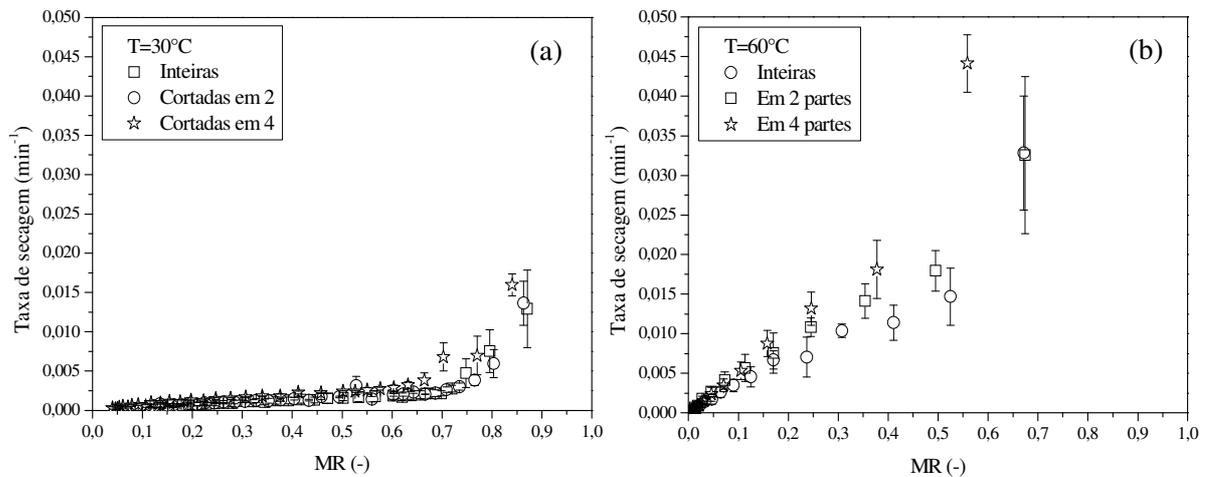
Fonte: Acervo pessoal.

Os ensaios foram efetuados mantendo-se a massa de folhas constante, e como o volume da célula também se manteve constante, a densidade *bulk* média dos leitos em todos os ensaios foi igual a $0,166\text{ g.cm}^{-3}$, que é um valor intermediário entre os valores das densidades *bulk* solta e compactada. Examinando a Figura 4.34, pode-se inferir que a estrutura do empacotamento é diferente em cada caso, pois esta densidade é obtida com diferentes graus de compactação quando se compara os leitos de folhas inteiras (razão $D/d_m=4,2$) e de folhas cortadas em quatro partes (razão $D/d_m=7,8$). A Figura 4.38 mostra os gráficos de taxa de secagem em função do adimensional de umidade obtidos na secagem das folhas de manjeriço em diferentes tamanhos e usando $T=30$ e 60°C .

Se considerarmos os valores médios de taxa de secagem é possível notar uma influência da temperatura, especialmente nos períodos iniciais. Enquanto para $T=30^\circ\text{C}$ e folhas cortadas em 4 partes, a taxa de secagem média máxima foi igual a $0,016\text{ min}^{-1}$, a taxa

média máxima obtida com o uso de $T=60^{\circ}\text{C}$ foi de $0,044\text{ min}^{-1}$. Analisando a dependência das taxas de secagem com a razão D/d_m observa-se uma tendência de aumento dos valores médios de taxas de secagem quando D/d_m passa de 4,2 para 7,8. Entretanto, devido as elevadas variações obtidas nos ensaios com folhas, a dispersão é significativa e não se pode afirmar que o aumento de D/d_m provocou um aumento nas taxas de secagem, já que as diferenças encontram-se dentro da faixa de desvios padrão.

Figura 4.38 – Taxas de secagem em função do adimensional de umidade obtidas na secagem das folhas de manjeriço em diferentes tamanhos; $U=0,40\text{m.s}^{-1}$: (a) $T=30^{\circ}\text{C}$ e (b) $T=60^{\circ}\text{C}$.



Fonte: Acervo pessoal.

4.6.3 Secagem em leitos espessos

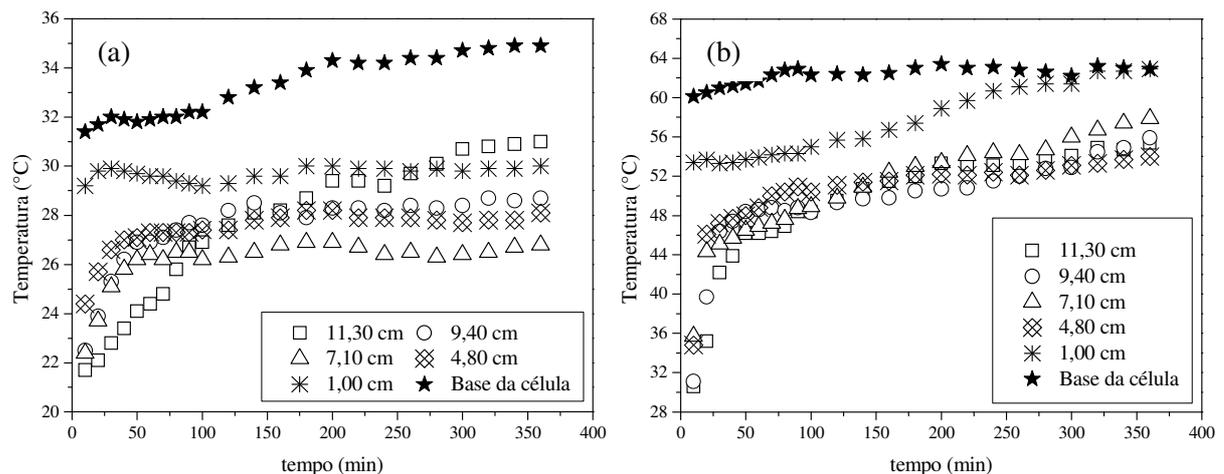
A secagem de leitos de folhas em camada espessa foi também avaliada em função da razão D/d_m . Distribuições de temperatura e umidade no leito foram obtidas em ensaios de secagem realizados utilizando valores de $T=30$ e 60°C . Os gráficos de T em função do tempo e umidade média do leito em função do tempo foram obtidos somente para leitos compostos por folhas cortadas em quatro partes ($D/d_m=7,8$), e os resultados foram comparados com os encontrados para os leitos de folhas inteiras (item 4.5.1).

4.6.3.1 Distribuição de temperatura no leito

A Figura 4.39 mostra os gráficos de distribuição de temperatura em função do tempo de secagem obtidos para os leitos de folhas com razão $D/d_m=7,8$, utilizando temperaturas iguais a 30 e 60°C , e velocidade do ar de secagem de $0,4\text{ m.s}^{-1}$.

Para os gráficos obtidos com $T=30^{\circ}\text{C}$ é possível notar que, assim como observado para as folhas inteiras (ver Figura 4.18, página 94), as temperaturas aumentam até um tempo de aproximadamente 100 minutos e, em seguida, tendem a um valor constante. Observa-se, no entanto, uma variação de temperatura um pouco maior entre as diferentes posições axiais do leito: enquanto na base da célula a temperatura tende a um valor $T\approx 34^{\circ}\text{C}$, na posição 7,10 cm, a temperatura estabilizou em cerca de 26°C . Os gráficos obtidos com o uso de $T=60^{\circ}\text{C}$ para as folhas em quatro partes foram semelhantes aos obtidos para as folhas inteiras. Entretanto, observa-se que, após um aquecimento inicial, as temperaturas nas diferentes camadas tendem a aumentar, embora a uma taxa menor que a observada no período inicial.

Figura 4.39 – Temperatura do leito de folhas de manjeriço em função do tempo de secagem parametrizado na altura da célula; Folhas cortadas em 4 partes; $U=0,40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) $T=30^{\circ}\text{C}$ e $R_h=30,3\%$; (b) $T=60^{\circ}\text{C}$ e $R_h=1,8\%$.

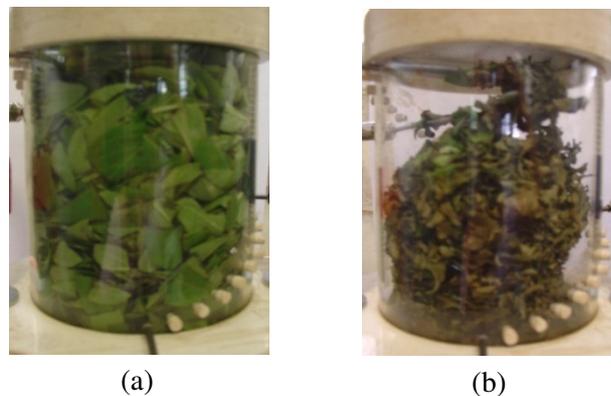


Fonte: Acervo pessoal.

O aumento da razão D/d_m não diminuiu os problemas de encolhimento e formação de canais preferenciais de escoamento de ar visualizados nos ensaios realizados com as folhas inteiras. A Figura 4.40 mostra fotografias da célula durante a secagem das folhas cortadas em quatro partes no tempo inicial e após 150 minutos de secagem, onde é possível observar que a contração de volume do leito e a formação de canais preferenciais permanecem presentes. Assim, novamente, foram encontrados aqui problemas nas medidas de T no leito. Por exemplo, em $z=11,30$ cm na Figura 4.40(a), a temperatura medida a partir de $t=260$ minutos chega a atingir valores superiores ao da base do leito ($z=1,0$ cm) e em $z=9,40$ cm foram atingidas temperaturas superiores às medidas para as camadas $z=4,80$ e $7,10$ cm.

Entretanto, com o aumento da razão D/d_m de 4,2 para 7,8, aumenta-se a área de contato das folhas com o ar de secagem e, como resultado, maiores taxas de transferência de calor e massa são esperadas. A tendência de aumento de T observada nos gráficos obtidos a 60°C está, provavelmente, relacionada às maiores taxas de transferência obtidas para as folhas em quatro partes. Na posição $z=1,00$ cm, por exemplo, a temperatura medida a partir de um $t=300$ minutos torna-se igual à temperatura do ar de secagem. Para $T=30^\circ\text{C}$ esse aumento nas taxas de transferência é também esperado, porém, um maior tempo de ensaio seria necessário para que a tendência de aumento em T fosse observada.

Figura 4.40 – Fotografias da célula de medida durante a secagem em camada espessa de folhas de manjeriço cortadas em 4 partes; $T=60^\circ\text{C}$; $U=0,4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) 0 minutos e (b) 150 minutos de secagem.



Fonte: Acervo pessoal.

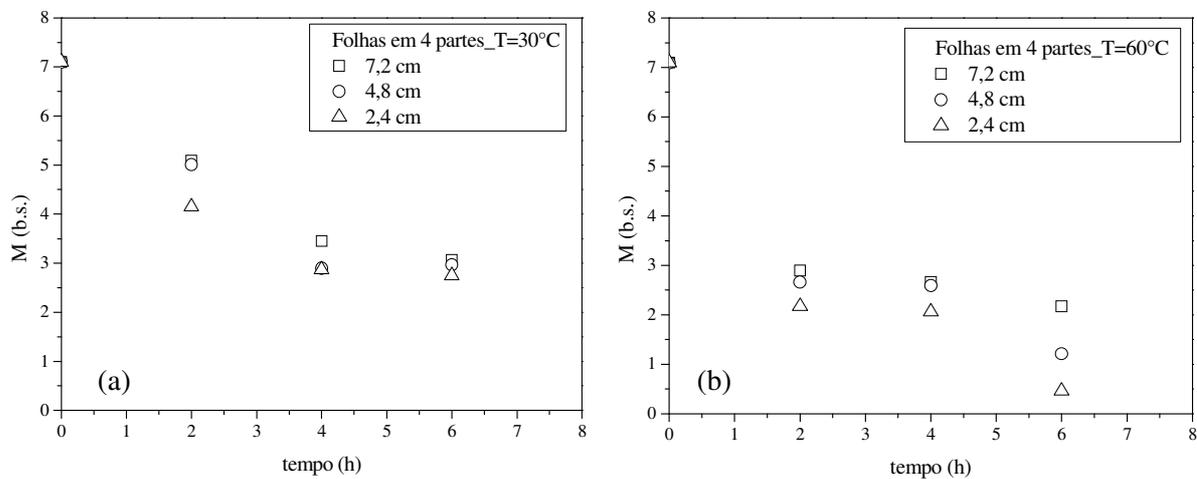
4.6.3.2 Distribuição de umidade no leito

A Figura 4.41 mostra os gráficos de distribuição de umidade em função do tempo de secagem obtidos em diferentes posições axiais de leitos constituídos por folhas de manjeriço cortadas em quatro partes e usando temperaturas iguais a 30°C e 60°C . Novamente, a obtenção de medidas de umidade média das folhas em todas as camadas ou subdivisões da célula de secagem não foi possível devido ao elevado encolhimento do leito de folhas, como mostra a Figura 4.42, que traz fotografias da célula obtidas durante a realização dos experimentos. Desta forma, nos gráficos da Figura 4.41 são apresentados valores de umidade média das folhas correspondentes a somente três alturas da célula de medida.

Para $T=30^\circ\text{C}$ (Figura 4.41(a)) é possível observar que o aumento na razão D/d_m não produziu variações significativas na distribuição de umidade obtida no leito. A redução de umidade permaneceu lenta, porém, variações sempre superiores a 10% foram obtidas nos

valores de umidade média entre a posição $z=2,4$ cm e as demais camadas. Além disso, as umidades médias das folhas em todas as camadas permaneceram elevadas ao final dos ensaios ($t=360$ minutos). Enquanto para as folhas inteiras ($D/d_m=4,2$) a umidade média no leito foi de 3,28 (b.s.), o valor encontrado para as folhas cortadas em 4 partes foi igual a 2,93 (b.s.), que corresponde a uma redução de somente 12% em relação ao valor inicial e corrobora o fato de que com o uso de $T=30^\circ\text{C}$, o aumento na razão D/d_m não resultou em um aumento significativo nas taxas de transferência de calor e massa entre as folhas e o ar de secagem.

Figura 4.41 – Umidade média do leito de folhas de manjeriço em função do tempo de secagem parametrizado na altura da célula; Folhas cortadas em 4 partes; $U=0,40\text{m.s}^{-1}$: (a) $T=30^\circ\text{C}$; (b) $T=60^\circ\text{C}$.

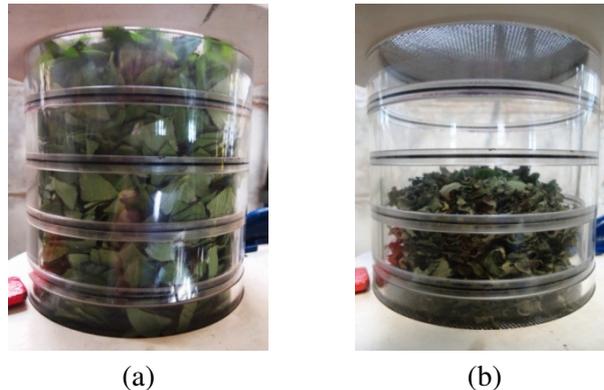


Fonte: Acervo pessoal.

Os gráficos de M (b.s.) em função do tempo e utilizando temperatura do ar de secagem de 60°C (Figura 4.41(b)), assim como os obtidos para $D/d_m=4,2$, mostraram uma redução maior e mais elevada no conteúdo de umidade média das folhas quando comparada à obtida para $T=30^\circ\text{C}$. As camadas localizadas em $z=4,8$ e $7,2$ cm apresentaram novamente reduções similares no conteúdo de umidade média, com variações em relação ao teor de umidade inicial inferiores a 9%, exceto para o tempo de 6 horas, em que essa variação foi igual a 20%. Entretanto, as maiores taxas de transferência de calor e massa obtidas com o uso de $D/d_m=7,8$ levaram a uma maior redução no conteúdo de umidade média do leito, que passou de 1,64 (b.s.) para 1,04 (b.s.), ou seja, ocorreu um aumento de 37% na redução da umidade média do leito quando D/d_m aumentou de 4,2 para 7,8. Para a camada mais próxima à base da célula ($z=2,4$ cm), o conteúdo de umidade passou de 7,10 para 0,46, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 94% no conteúdo de umidade média das

folhas, 10% a mais que o obtido para o leito de folhas inteiras sob condições similares de temperatura e velocidade do ar de secagem.

Figura 4.42 – Fotografias da célula de medida durante a secagem em camada espessa de folhas de manjeriço cortadas em 4 partes; $T=60^{\circ}\text{C}$; $U=0,4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) 0 minutos e (b) 240 minutos de secagem.



Fonte: Acervo pessoal.

4.7 Secagem com encolhimento ‘controlado’

Com o intuito de analisar o leito de folhas efetivamente como um meio poroso foram realizados ensaios de secagem utilizando folhas inteiras de manjeriço para as temperaturas de 30 e 60°C, e uma placa de acrílico perfurada como ‘contrapeso’ no topo do leito, conforme descrito no item 3.2.1.4. Este ‘contrapeso’ foi usado com o objetivo de evitar a deformação lateral observada nos ensaios anteriores e, assim, quantificar o encolhimento com base somente na deformação axial do leito.

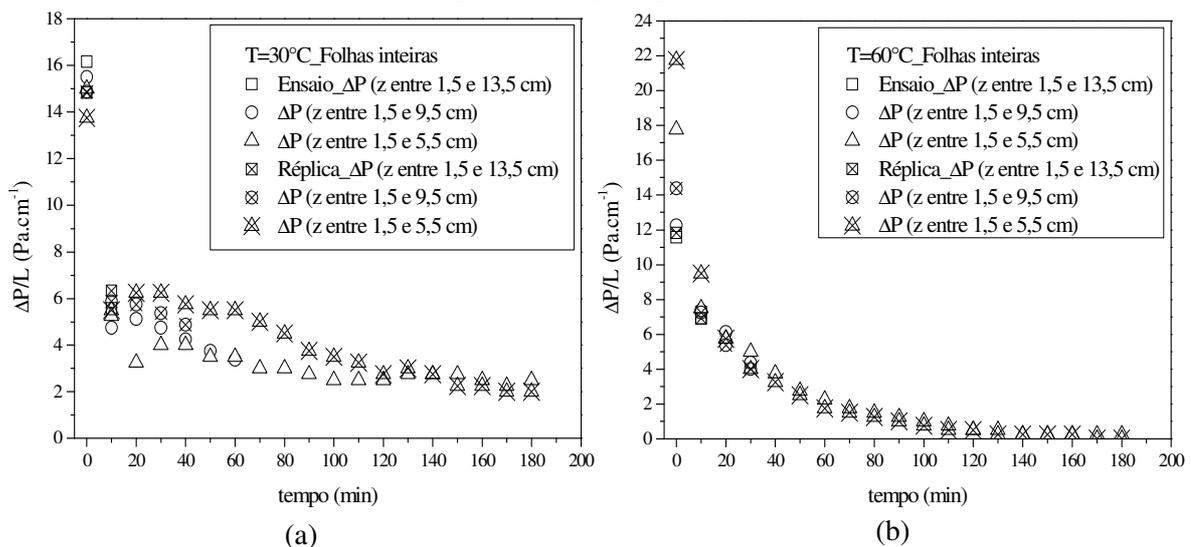
Na Figura 4.43 são mostradas as curvas de queda de pressão por unidade de comprimento do leito ($\Delta P/L$) em função do tempo de secagem obtidas com o uso de $T=30^{\circ}\text{C}$ (Figura 4.43(a)) e $T=60^{\circ}\text{C}$ (Figura 4.43(b)), e velocidade superficial do ar de $0,40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Apesar de apresentar características que dificultam a reprodução de meios com propriedades similares, todas as curvas obtidas para os leitos de folhas mostram que a queda de pressão diminui inicialmente a uma taxa muito alta, tendendo depois a um valor constante, uma variação com comportamento tipicamente exponencial. No início do processo observa-se que a queda de pressão nas diferentes camadas dos leitos sofre uma brusca redução (até 10 minutos de secagem). Após este tempo, uma pequena variação nos valores de queda de pressão é observada, e $\Delta P/L$ tende a permanecer constante para valores de tempo superiores à aproximadamente 100 minutos.

O comportamento das curvas obtido para as folhas difere do observado em leitos fixos particulados constituídos por partículas sólidas rígidas. Para escoamentos em meios porosos a baixas velocidades, tem-se que o gradiente de pressão é diretamente proporcional à velocidade média do fluido newtoniano (U) e à espessura (L) do leito (Lei de Darcy):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{\kappa} U \tag{57}$$

onde μ é a viscosidade do fluido e κ a permeabilidade do meio poroso.

Figura 4.43 – Leito fixo e camada espessa de folhas inteiras de manjeriço; $U=0,40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; $\Delta P/L$ em função do tempo de secagem para (a) $T=30^\circ\text{C}$; (b) $T=60^\circ\text{C}$.



Fonte: Acervo pessoal.

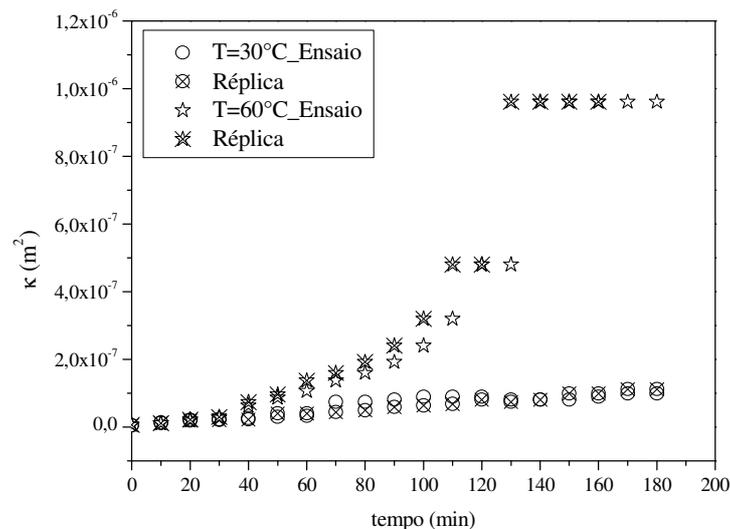
Em meios porosos homogêneos e indeformáveis, a permeabilidade é constante e a equação de Darcy prevê um aumento linear da queda de pressão com o aumento na vazão de ar. Neste caso, a resistência ao escoamento (quantificada pela permeabilidade do leito) é constante, o que não acontece no caso das folhas.

A variação na queda de pressão mostra que a permeabilidade muda ao longo do tempo, como pode ser observada nas curvas da Figura 4.44, que mostram estimativas da permeabilidade média do leito ao longo do processo de secagem das folhas, obtidas com o uso da Equação de Darcy. Para $T=30^\circ\text{C}$ é possível observar que a permeabilidade final no leito é

cerca de 22 vezes maior que a permeabilidade no início da secagem. Para $T=60^{\circ}\text{C}$, esse número sobe para 141 vezes.

A variação observada na permeabilidade do leito ocorre devido ao encolhimento acentuado e modificações na estrutura do ‘pacote’, que diminuem a resistência oferecida ao escoamento do ar, resultando em uma redução significativa nas perdas de carga. Para $T=60^{\circ}\text{C}$ é possível notar ainda que a permeabilidade do leito atinge um valor constante a partir de $t=130$ minutos. Neste tempo, o leito ainda encontra-se úmido em seu interior (ver Figura 4.46(c)) e um leve encolhimento lateral foi observado nas proximidades das paredes da célula. Como as tomadas de pressão estão localizadas na parede, este comportamento pode estar relacionado ao fato de que, com o uso de $T=60^{\circ}\text{C}$, a canalização de ar próxima à parede da célula resultou em medidas de perda de carga que não são mais representativas da resistência do meio poroso a partir de 130 minutos de secagem.

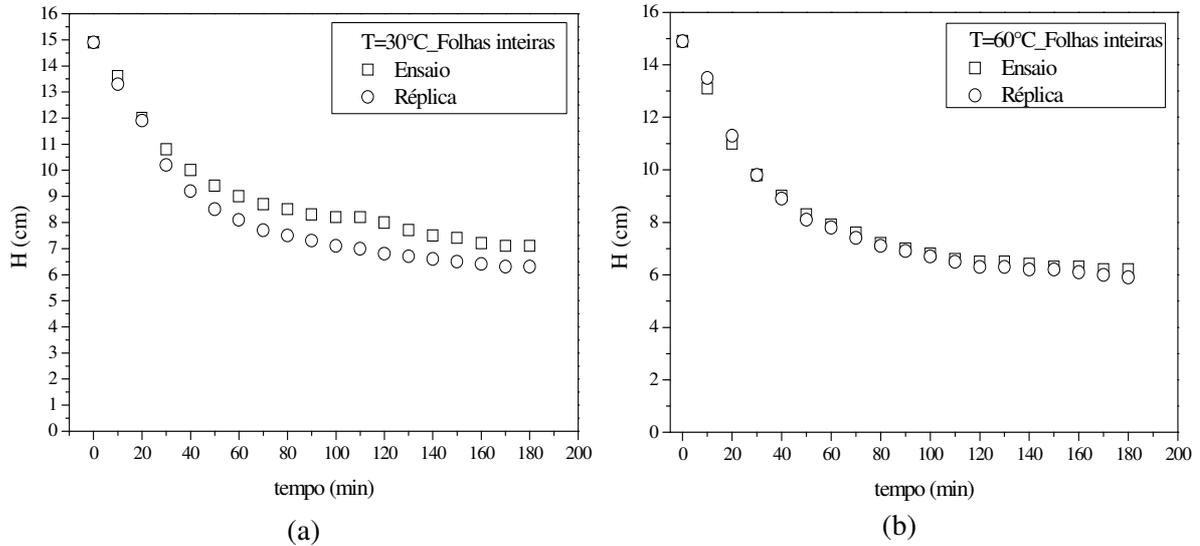
Figura 4.44 – Permeabilidade do leito em função do tempo via equação de Darcy.



Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 4.45 mostra os gráficos da altura do leito em função do tempo de secagem obtidos utilizando temperaturas do ar iguais a 30°C (Figura 4.45(a)) e 60°C (Figura 4.45(b)). É possível observar que a contração de volume dos leitos ocorre rapidamente, sendo reduções médias iguais a 43% e 47% observadas na primeira hora de experimento para $T=30^{\circ}\text{C}$ e 60°C , respectivamente. Nota-se ainda que a redução de volume observada nos leitos foi similar e ao final dos ensaios, o encolhimento dos leitos chegou a 55 e 59%, ou seja, uma diferença de apenas 8% foi observada com o aumento da temperatura de 30 para 60°C .

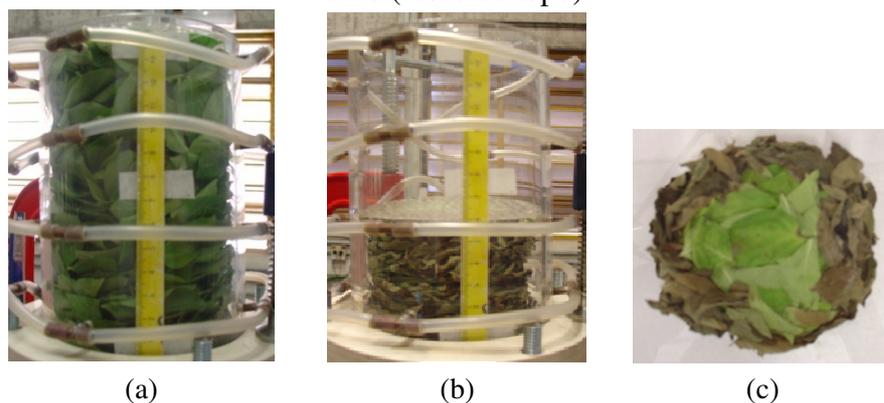
Figura 4.45 – Leito fixo e camada espessa de folhas inteiras de manjeriço; $U=0,40\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; Variação da altura do leito em função do tempo de secagem para: (a) $T=30^\circ\text{C}$; (b) $T=60^\circ\text{C}$.



Fonte: Acervo pessoal.

As variações de volume obtidas ao longo da secagem das folhas foram bastante significativas como mostra a Figura 4.46, que traz fotografias da célula durante a secagem com $T=60^\circ\text{C}$ no início do processo (Figura 4.46(a)) e após 180 minutos de secagem (Figura 4.46(b)).

Figura 4.46 – Fotografias da célula obtidas durante a secagem em camada espessa das folhas inteiras de manjeriço; $T=60^\circ\text{C}$; tempo de secagem (a) 0 e (b) 180 minutos; (c) Interior do leito (visão de topo).



Fonte: Acervo pessoal.

O elevado encolhimento leva a alterações nas dimensões e formato das folhas e, assim, alteram a estrutura do ‘pacote’ formando leitos altamente heterogêneos, cujas propriedades *bulk* mudam, localmente e com o tempo, de forma muito acentuada. Além disso, os dados de encolhimento reiteram a falta de homogeneidade da secagem em leitos de

camadas espessas de folhas, como mostra a Figura 4.46(c), que traz uma fotografia (visão de topo) do interior do leito, onde é possível notar que as folhas permaneceram com umidade elevada no centro e a formação de canais preferenciais de escoamento favoreceu a secagem nas laterais do leito. Dessa forma, as variações de volume obtidas aqui não podem ser desprezadas e, se não consideradas, tornam pouco úteis a análise e a modelagem matemática dos dados experimentais obtidos com folhas.

Após uma análise dos resultados, percebe-se que as dificuldades levantadas inicialmente ao se trabalhar com folhas estiveram presentes em todos os ensaios realizados, independente destes envolverem secagem, análise fluidodinâmica ou determinação de propriedades físicas dos leitos constituídos por folhas. A heterogeneidade do meio, a dificuldade de se conseguir pacotes reproduzíveis, a intensa deformação dos leitos quando expostos a um escoamento ou aquecimento (ainda que sob velocidades e temperaturas moderadas) são características inerentes aos ‘pacotes’ de folhas e são determinantes na forma como ocorrem as interações entre as fases sólida e fluida em processos como a secagem, seja ela realizada em leitos fixos ou móveis. A aplicação de modelos baseados na formulação pseudo-homogênea para estes leitos é fisicamente inconsistente, uma vez que estes modelos não consideram tais características. Mesmo os modelos totalmente empíricos, resultantes do ajuste de dados de cinética de secagem em camada fina, são pouco confiáveis e têm utilidade limitada.

O presente trabalho teve o propósito de mostrar as inúmeras falhas da abordagem atualmente utilizada na análise da secagem de folhas. Obviamente, a compreensão dos mecanismos físicos envolvidos nos processos de transferência de calor e massa durante a secagem de folhas requer ainda muitas pesquisas que abordem o problema de forma consistente, quando este é considerado de um ponto de vista acadêmico e científico.

Estas dificuldades não impedem que a secagem de folhas em secadores convectivos seja uma operação bem sucedida do ponto de vista industrial e tecnológico, tanto que ela é largamente aplicada. Isto porque é possível obter uma secagem homogênea com o uso de técnicas de mistura adequadas, como a agitação manual (em secadores de estufa ou de bandejas) ou com o uso de secadores que promovam a mistura ou agitação mecânica do material, como os secadores rotativos ou secadores baseados em leitos vibrados e vibro-aerados.

5 CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas a partir da análise dos resultados são:

- as diferentes metodologias utilizadas na caracterização físico-química das folhas de manjerição permitiram a determinação de propriedades como dimensão média ($d_m=2,36$ cm), área superficial ($A_p=9,32$ cm²), esfericidade ($\phi=0,160$), espessura média ($\delta=0,023$ cm), massa específica ($\rho_p=0,874$ g.cm⁻³), teor de umidade inicial ($M_i=7,10$ (b.s.)) e teor de umidade de equilíbrio. As isotermas de sorção foram adequadamente descritas pelos modelos de Halsey modificado e Sigma-Copace para as temperaturas de 30, 45 e 60°C e umidade relativa variando de 0,110 a 0,836. O teor de óleo essencial extraído das folhas *in-natura* (0,40% (m/m)) e seus componentes majoritários (linalol, 1,8-cineole e eugenol) foram também determinados. Para o material da folha mediu-se ainda a condutividade térmica efetiva ($k_{ef}=0,05$ Wm⁻¹K⁻¹) e o calor específico ($C_p = -1,92+0,116T-8,19 \times 10^{-4}T^2$);
- a metodologia utilizada na determinação da densidade *bulk* dos leitos permitiu a obtenção de valores reprodutíveis das densidades *bulk* para empacotamentos soltos e compactados. Os resultados indicaram que a densidade *bulk* média dos pacotes foi afetada pelo tamanho das folhas (ou razão D/d_m), pelo teor de umidade, e também pelo grau de compactação do material no leito. Para leitos soltos constituídos por folhas *in-natura* inteiras, a densidade *bulk* média foi igual a 0,089 g.cm⁻³. Para leitos compactados, as densidades *bulk* foram até 2,2 vezes maiores do que as do leito com empacotamento solto. A densidade *bulk* dos leitos constituídos por folhas *in-natura* cortadas em 4 partes foi, em média, 20% maior em comparação com a das folhas inteiras ou cortadas no meio. Além disto, a densidade *bulk* diminuiu significativamente com a redução do teor de umidade, com variações de até 86%;
- nos ensaios de secagem, a falta de reprodutibilidade dos pacotes e a deformação dos leitos, bem como a formação de canais preferenciais de escoamento foram problemas constatados para diferentes configurações de contato sólido-fluido. Estes problemas ocorrem devido às características intrínsecas do material (baixa densidade, área superficial grande e volume pequeno, textura superficial rugosa, etc.) e à sua variabilidade biológica, que fazem com que cada amostra seja única, e que os pacotes de folhas sejam muito heterogêneos e não reprodutíveis. Estes fatores foram limitantes na maioria dos ensaios de secagem efetuados;

-
- nos ensaios de secagem em camada fina, as curvas de cinética de secagem para condições idênticas de temperatura e velocidade do ar não foram reprodutíveis, devido à dificuldade de reproduzir os pacotes de folhas. Além disto, em todas as condições investigadas foi observado encolhimento significativo do material, o que faz com que as características do pacote mudem muito ao longo da secagem. Mesmo com esta dificuldade, a análise das curvas de secagem em termos de valores médios permitiu constatar que o aumento da temperatura de 30 para 60°C aumenta significativamente as taxas de secagem. Por outro lado, não foi possível comprovar um efeito do aumento da razão D/d_m (que variaram entre 4,2 a 7,8) sobre as taxas de secagem.
 - o ajuste de modelos empíricos para descrever a variação do teor de umidade em função do tempo não foi efetuado, porque nas condições aqui investigadas, apesar de ser possível obter bons ajustes segundo critérios estatísticos, os parâmetros ajustados são pouco confiáveis devido à não reprodutibilidade observada entre os ensaios e suas réplicas;
 - nos ensaios de secagem em leitos espessos, a formação de canais preferenciais de escoamento nas proximidades das paredes da célula, bem como o encolhimento e a deformação acentuada dos leitos de folhas, impediram a obtenção de perfis axiais de temperatura consistentes, enquanto os perfis de umidade ficaram sujeitos a uma incerteza considerável. O contato entre as fases fluida e sólida era de má qualidade, o que resultou em uma secagem pouco efetiva e não uniforme. A redução do teor de umidade média, obtido a partir de medidas nas diferentes posições axiais, foi muito pequena, particularmente para a secagem com ar a temperatura de 30°C;
 - a observação visual e os resultados obtidos na avaliação do comportamento fluidodinâmico das folhas inteiras de manjerição em leitos móveis mostraram que as folhas não fluidizam e que as curvas de queda de pressão em função da velocidade do ar não apresentaram boa reprodutibilidade. Para leitos com razões $H_0/D_{eq} < 1,0$ foi observada uma pequena expansão do leito a partir de uma velocidade de escoamento do ar de aproximadamente $0,6 \text{ m.s}^{-1}$. Devido à formação de muitos canais preferenciais de escoamento de ar junto às paredes da câmara, a secagem em leito ‘expandido’ não foi homogênea e a umidade média se manteve elevada, mesmo após 14 h de operação (M foi igual a 1,00 (b.s.), enquanto M_e para condições similares de temperatura e umidade relativa é de 0,23 (b.s.));
 - a inserção de vibração no leito não alterou de forma significativa o seu comportamento fluidodinâmico. Entretanto, proporcionou a redução dos canais preferenciais e uma maior movimentação das folhas no interior da câmara. Dentre as condições de secagem avaliadas neste estudo, a secagem em leito ‘vibro-aerado’ com adimensional de vibração igual a 1,0 e amplitude de vibração igual a 0,5 cm foi a única que resultou em um produto final seco de

forma homogênea, sendo que a umidade foi reduzida de 7,55 para 0,19 (b.s.) após um tempo de 8 horas de secagem;

- as curvas de cinética de secagem, que mostram a redução do teor de umidade em função do tempo, obtidas para a secagem em camada fina com escoamento de ar paralelo à amostra foram similares às obtidas para a secagem com escoamento de ar cruzado. Este fato reforça a constatação de que a configuração de escoamento cruzado não promove bom contato entre o ar e as folhas;

- o uso de um ‘contrapeso’ no topo da célula de secagem mostrou-se efetivo para evitar a deformação lateral do leito e manter o encolhimento preferencialmente na direção axial. Esta técnica permitiu a medição do encolhimento vertical dos leitos, tendo-se observado reduções de 42 a 47% na altura na primeira hora de secagem, para temperaturas do ar de 30 e 60°C, respectivamente, e

- a partir de medidas de perda de carga no leito em função do tempo, feitas em condições de encolhimento ‘controlado’, foi possível estimar a permeabilidade média do leito e sua variação em função do tempo de secagem. Devido ao elevado encolhimento e às modificações na estrutura do ‘pacote’ de folhas, que diminuíram a resistência oferecida ao escoamento do ar, constatou-se que a permeabilidade aumenta ao longo do tempo de secagem. Para a secagem a 30°C, o valor estimado foi de $4,60 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ no início da secagem e de $9,93 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ no final, após um tempo de 3 horas.

Finalizando, constata-se que, apesar da estrutura dos meios porosos ser determinante na secagem convectiva de leitos constituídos por folhas, o pacote não vem sendo adequadamente considerado nas análises sobre secagem. Contudo, este estudo mostrou que uma boa compreensão dos aspectos fundamentais da secagem de folhas visando a modelagem matemática e a descrição realista do processo físico, requer que as características dos pacotes sejam incorporadas na análise. Para tanto, é necessário que se avance na caracterização das propriedades estruturais dos leitos e de suas alterações ao longo do processo.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros que poderão contribuir para o aumento do conhecimento a respeito da secagem convectiva de folhas. São elas:

- realização de ensaios de secagem de folhas em equipamentos baseados em outras formas de contato sólido-fluido como, por exemplo, secador rotativo e secador esteira, e utilizando outras formas de aquecimento que não a do ar, como a secagem por radiação infravermelha e micro-ondas;
- realização de ensaios de secagem em camada fina para valores da razão D/d_m maiores que 7,8 com o intuito de identificar se existe um valor crítico acima do qual os leitos de folhas possam ser analisados como leitos pseudo-homogêneos e, também, averiguar se, com a redução nas dimensões das folhas, podem ser conseguidos empacotamentos reproduzíveis;
- estudo do efeito de parede para leitos constituídos por folhas de diferentes tamanhos através da obtenção experimental de perfis de porosidade radiais e axiais, e obtenção da razão (D/d_m) crítica abaixo do qual o efeito de parede é atuante;
- realização de ensaios de secagem com encolhimento ‘controlado’ para folhas cortadas, com o objetivo de se ter uma estimativa da deformação e da permeabilidade média do leito, e de como esta propriedade muda ao longo do processo de secagem em função da razão D/d_m ;
- estudar o efeito da intersecção das isotermas obtidas para as folhas de manjeriço, relacionando este comportamento com a composição química do material e avaliando como os constituintes se alteram com a redução de umidade das folhas e,
- aprofundar o estudo do encolhimento e da determinação da permeabilidade média de leitos constituídos por folhas através da realização de ensaios de secagem utilizando folhas de outras espécies de plantas, e variando, por exemplo, a temperatura do ar de secagem e a massa do ‘contrapeso’ utilizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, E. C.; GELDART, D. The use of bulk density measurements and flowability indicators. **Powder Technology**, v. 102, p. 151-165, 1999.

ADAMS, R. P. **Identification of essential oil components by gas chromatography/mass spectroscopy**. Carol Stream, IL, USA: Allured Publishing Corporation, 1995. 469 p.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). **Estudo prospectivo indústria de higiene pessoal, perfumaria e cosméticos**. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Brasília: ABDI, 2009. 208 p. (Série Cadernos da indústria ABDI XIII).

AKPINAR, E. K. Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants. **Journal of Food Engineering**, v. 77, p. 864-870, 2006.

AL-MUHTASEB, A. H.; McMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review. **Trans IChemE**, v. 80, part C, p. 118-128, 2002.

ALMEIDA, S. P. et al. **Cerrado: espécies vegetais úteis**. Planaltina: EMBRAPA/CPAC, 1998. 464 p.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). **Official methods of analysis**, 15th edition. Washington, DC, 1990.

BARATA, L. E. S.; QUEIROZ, S. R. R. **Contribuição efetiva ou potencial do PADCT para o aproveitamento econômico sustentável da biodiversidade: estudo elaborado para o programa de apoio ao desenvolvimento científico e tecnológico (PADCT), sub-programa de planejamento e gestão em ciência e tecnologia (PGCT) do Ministério da Ciência e Tecnologia**. Campinas, SP, 1995.

BARITAU, O. et al. Effects of drying and storage of herbs and spices on the essential oil. Part I. Basil, *Ocimum basilicum* L.. **Flavour and Fragrance Journal**, v. 7, p. 267-271, 1992.

BASSOLÉ, I. H. N. et al. Composition and antimicrobial activities of *Lippia multiflora* Moldenke, *Mentha x piperita* L. and *Ocimum basilicum* L. **Molecules**, v. 15, p. 7825-7839, 2010.

BASU, S.; SHIVHARE, U. S.; MUJUMDAR, A. S. Models for sorption isotherms for foods: a review. **Drying Technology**, v. 24, p. 917-930, 2006.

BATALHA, M. O.; MING, L. C. (coord.). **Plantas medicinais e aromáticas: um estudo de competitividade no estado de São Paulo**. São Paulo, SP: SEBRAE, 2003. 240 p.

BILALI, L. et al. Application of the Henderson and the BET model to the moisture sorption isotherms of humid natural phosphate. In: KERKHOF, P. J. A. M.; COUMANS, W. J.;

MOOIWEER, G. D. (ed.) International Drying Symposium (IDS2000), 12., 28-31 aug. 2000, Netherlands. **Proceedings of the 12th International Drying Symposium**. Netherlands: Elsevier Science, 2000. Paper n. 13.

BRAGA, N. P. **Influência da secagem no rendimento e na composição do óleo essencial das folhas de *Eucalyptus citriodora***. 2002. 151 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2002.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: An Avi, 1992. 450 p.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**, v. 60, p. 309-319, 1938.

CAROVIĆ-STANKO, K. et al. Composition and antibacterial activities of essential oils of seven *Ocimum* taxa. **Food Chemistry**, v. 119, p. 196-201, 2010.

CHANDRA, P. K.; SINGH, R. P. **Applied numerical methods for food and agricultural engineers**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1995. p. 163-167.

CHANG, C. S. Measuring density and porosity of grain kernels using a gas pycnometer. **Cereal Chemistry**, v. 65, p. 13-15, 1988.

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

CHEN, C. S.; CLAYTON, J. T. The effect of temperature on sorption isotherms of biological materials. **Transactions of the ASAE**, v. 14, n. 5, p. 927-929, 1971.

CHIANG, L. C. et al. Antiviral activities of extracts and selected pure constituents of *Ocimum basilicum*. **Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology**, v. 32, p.811-816, 2005.

CHUNG, D. S.; PFOST, H. B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. **Transactions of the ASAE**, v. 10, n. 4, p. 549-551, 1967.

COLTTERS, R.; RIVAS, A. L. Minimum fluidation velocity correlations in particulate systems. **Powder Technology**, v. 147, p. 34-48, 2004.

COLLINS, C. H.; BRAGA, G. L.; BONATO, P. S. **Introdução a métodos cromatográficos**. 7. ed. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 1997. 279 p.

CORDEIRO, D. S. **Secagem de plantas aromáticas e medicinais: obtenção de isothermas de equilíbrio e características de secagem das folhas de *Maytenus ilicifolia* (espinheira santa) e de *Cymbopogon citratus* (capim-limão)**. 2005. 178 p. Tese (Doutorado em Ciências Farmacêuticas) – Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, SP, 2005.

CORDEIRO, D. S.; RAGHAVAN, G. S. V.; OLIVEIRA, W. P. Equilibrium moisture content models for *Maytenus ilicifolia* leaves. **Biosystems Engineering**, v. 94, n. 2, p. 221-228, 2006.

CORRÊA, P. C.; MARTINS, D. S. R.; MELO, E. C. **Umigrãos**: Programa para o cálculo do teor de umidade de equilíbrio para os principais produtos agrícolas. Viçosa, MG: Centreinar/UFV, 1995. 10 p.

CORRÊA, P. C. et al. Modelo matemático para representação da higroscopicidade de plantas medicinais. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 27, n. 1, p. 8-15, 2002.

CRUZ, G. L. **Livro verde das plantas medicinais e industriais do Brasil**. Belo Horizonte, MG: Oficinas Gráficas de Velloso, 1965. v. 2, 427-863 p.

CUI, H.; GRACE, J. R. Fluidization of biomass particles: a review of experimental multiphase flow aspects. **Chemical Engineering Science**, v. 62, p. 45-55, 2007.

DALEFFE, R. V.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. Drying of pastes in vibro-fluidized beds: effects of the amplitude and frequency of vibration. **Drying Technology**, v. 23, n. 9-11, p. 1765-1781, 2005.

DALEFFE, R. V.; FREIRE, J. T. Analysis of the fluid-dynamic behavior of fluidized and vibrofluidized bed containing glycerol. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 21, n. 1, p. 35-46, jan./mar. 2004.

DELLA TONIA JÚNIOR, V. G. **Desenvolvimento, instrumentação e fluidodinâmica de um leito vibrofluidizado**. 1990. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 1990.

DI STASI, L. C.; HIRUMA-LIMA, C. A. **Plantas medicinais na Amazônia e na Mata Atlântica**. 2. ed. São Paulo, SP: UNESP, 2002. 604 p.

DIAS, R. A. L.; SOUZA, P. S.; ALSINA, O. L. S. Secagem e extração de taninos totais da hortelã (*Mentha x vilosa* Hudson). **Revista Agrarian**, Campina Grande, PB, v. 4, n. 12, p. 123-133, 2011.

DOYMAZ, İ. Thin-layer drying behavior of mint leaves. **Journal of Food Engineering**, v. 74, p. 370-375, 2006.

DOYMAZ, İ.; TUGRUL, N.; PALA, M. Drying characteristics of dill and parsley leaves. **Journal of Food Engineering**, v. 77, p. 559-565, 2006.

ERBAY, Z.; ICIER, F. Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology. **Journal of Food Engineering**, v. 91, p. 533-541, 2009.

ERBAY, Z.; ICIER, F. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 50, p. 441-464, 2010a.

ERBAY, Z.; ICIER, F. Thin-layer drying behaviors of olive leaves (*Olea europaea* L.). **Journal of Food Process Engineering**, v. 33, p. 287-308, 2010b.

ERDÉSZ, K. Hydrodynamic studies on vibrated fluidized beds. **Power Handling & Processing**, v. 2, n. 4, p. 327-339, 1990.

FARIA, L. J. G. **Análise experimental do processo de secagem de urucum (*Bixa orellana* L.) em leito fixo**. 1998. 274 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1998.

FERREIRA, S. H. (org.). **Medicamentos a partir de plantas medicinais no Brasil**. Rio de Janeiro, RJ: Academia Brasileira de Ciências, 1998. 131 p.

FERREIRA, M. M. P. **Desenvolvimento, caracterização e secagem de sementes com cobertura artificial**. 2003. 235 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2004.

FIGUEIRA, G. M.; SILVA, F.; MAGALHÃES, P. M. Estudo da umidade de equilíbrio de duas espécies de plantas do gênero *Phyllanthus* após secagem para o armazenamento. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 14, supl. 1, p. 22-24, 2004.

FREIRE, E. S. **Thermal properties of dry cocoa beans**. 1981. 122 p. MSc. (Thesis) – Cranfield Institute of Technology, National College of Agricultural Engineering, Cranfield, Bedfordshire, England, 1981.

FREITAS, C. O. et al. Características físicas da oleaginosa tucumã (*Astrocaryum vulgare*, Mart.). In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DO BIODIESEL, 1., 2006, Brasília, DF. **Artigos técnico-científicos do I Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia do Biodiesel**, p.8-11. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2006/agricultura/Caracter%EDsticasFisicasOleaginoso.pdf>>. Acesso em: abr. 2011.

GARCIA-ALVARADO, M. A. et al. Statistical analysis of the GAB and Henderson equations for sorption isotherms of foods. **Drying Technology**, v. 13, n. 8&9, p. 2141-2152, 1995.

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

GERMAN, R. M. **Particle packing characteristics**. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1989. 443 p.

GONÇALVES, A. P. C. et al. Avaliação das atividades biológicas e físico-químicas do óleo essencial obtido de *Ocimum basilicum* cultivada em diferentes condições de adubação. In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA CESUMAR (EPCC), 5., 2007, Maringá, PR. **Anais do V Encontro Internacional de Produção Científica**. Maringá: CESUMAR, 2007. 5 p. Disponível em: http://www.cesumar.br/prppge/pesquisa/epcc2007/anais/ana_paula_cazangi_goncalves.pdf. Acesso em: abr 2011.

- GREENSPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, v. 81A, n. 1, p. 89-96, 1977.
- GUBULIN, J. C.; FREIRE, J. T. **Laboratório didático**: tópicos especiais em fenômenos de transporte. São Carlos: Editora da UFSCar, 1990. 165 p.
- GUPTA, R.; MUJUMDAR, A. S. Aerodynamics of a vibrated fluid bed. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 58, p. 332-338, 1980a.
- GUPTA, R.; MUJUMDAR, A. S. Aerodynamic and thermal characteristics of vibrated fluid beds: a review. In: MUJUMDAR, A. S. (ed.). **Drying'80, v. 1: Developments in Drying**, Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1980b. p. 141-150.
- HALSEY, G. Physical adsorption on non-uniform surfaces. **Journal of Chemical Physics**, v. 16, p. 931-937, 1948.
- HENDERSON, S. M. A basic concept of equilibrium moisture. **Agricultural Engineering**, v. 33, p. 29-32, 1952.
- HENDERSON, S. M. Progress in developing the thin layer drying equation. **Transactions of the ASAE**, v. 17, n. 6, p. 1167-1168, 1974.
- HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 6, n. 3, p. 169-174, 1961.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 698 p.
- KAYA, A.; AYDIN, O. An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves **Energy Conversion and Management**, v. 50, p. 118-124, 2009.
- KEEY, R. B. **Drying**: principles and practice. Oxford: Pergamon Press, 1972. 358 p. (International Series of Monographs in Chemical Engineering, 13).
- KOUTSOS, T. V.; CHATZOPOULOU, P. S.; KATSIOTIS, S. T. Effects of individual selection on agronomical and morphological traits and essential oil of a "Greek basil" population. **Euphytica**, v. 170, p. 365-370, 2009.
- KUDRA, T.; MUJUMDAR, A. S. **Advanced drying technologies**. New York: Marcel Dekker, 2002. 459 p.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1969. 534 p.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization engineering**. 2. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991. 491 p. (Butterworth-Heinemann Series in Chemical Engineering).
- KUROZAWA, L. E. et al. Thermal conductivity and thermal diffusivity of papaya (*Carica papaya* L.) and cashew apple (*Anacardium occidentale* L.). **Brazilian Journal of Food Engineering**, v. 11, n. 1, p. 78-85, 2008.

- LABUZZA, T. P.; KAAANANE, A.; CHEN, J. Y. Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. **Journal of Food Science**, v. 50, p. 385-390, 1985.
- LAHSASNI, S. et al. Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*). **Energy**, v. 29, p. 211-224, 2004.
- LEWIS, W. K. The rate of drying of solid materials. **The Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 13, n. 5, p. 427-432, 1921.
- LIMA, R. A. B. **Fluidodinâmica de leitos fluidizados e vibrofluidizados operando com partículas planas**. 2009. 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2009.
- LIMA, R. A. B.; FERREIRA, M. C. Fluidized and vibrofluidized shallow beds of fresh leaves. **Particuology**, v. 9, p. 139-147, 2011.
- LIMA, R. A. B.; FERREIRA, M. C. Analysis of convective drying of basil leaves. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM (IDS2012), 18., 11-15 nov. 2012, Xiamen, China. **Conference Proceedings of the 18th International Drying Symposium**. Xiamen, China, 2012, p. 1-8. 1 CD-ROM.
- LIPPENS, B. C.; MULDER, J. Prediction of the minimum fluidization velocity. **Powder Technology**, v. 75, p. 67-78, 1993.
- LIU, B. et al. Fluidization of non-spherical particles: sphericity, zingg factor and other fluidization parameters. **Particuology**, v. 6, p. 125-129, 2008.
- LORENZI, H.; MATOS, F. J. A. **Plantas medicinais no Brasil: nativas e exóticas**. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2002. 512 p.
- LUCAS, A. et al. Improved equation for the calculation of minimum fluidization velocity. **Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development**, v. 25, n. 2, p. 426-429, 1986.
- MAROULIS, Z. B. et al. Application of the GAB model to the moisture sorption isotherms of dried fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 7, p. 63-78, 1988.
- MARTINS, P. M. **Influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem no teor e na composição química do óleo essencial de capim-limão (*Cymbopogon citratus* (D.C.) Stapf)**. 2000. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000.
- MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. 2. ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2002. 152 p.
- MATA, M. E. R. M. C.; DUARTE, M. E. M. Porosidade intergranular de produtos agrícolas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, PB, v. 4, n. 1, p. 79-93, 2002.

-
- MOHAMED, L. A. et al. Single layer solar drying behaviour of *Citrus aurantium* leaves under forced convection. **Energy Conversion and Management**, v. 46, p. 1473-1483, 2005.
- MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1970. 734 p.
- MOHSENIN, N. N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1980. 407 p.
- MONTILLET, A.; LE COQ, L. Characteristics of fixed beds packed with anisotropic particles: use of image analysis. **Powder Technology**, v. 121, p. 138-148, 2001.
- MUJUMDAR, A. S. Aerodynamic characteristics of a vibrated bed of particles. In: MUJUMDAR, A. S. (ed.). **Drying'84**, Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1984. p. 178-185.
- MUJUMDAR, A. S. Principles, classification, and selection of dryers. In: MUJUMDAR, A. S. (ed.). **Handbook of Industrial Drying**. 3. ed. New York: Taylor & Francis, 2006. p. 4-32.
- OSBORN, G. S. et al. Predicting equilibrium moisture proportions of soybeans. **Transactions of the ASAE**, v. 32, n. 6, p. 2109-2113, 1989.
- OSWIN, C. R. The kinetics of package life. III. The isotherm. **Journal of the Society of Chemical Industry**, v. 65, p. 419-421, 1946.
- ÖZCAN, M.; ARSLAN, D.; ÜNVER, A. Effect of drying methods on the mineral content of basil (*Ocimum basilicum* L.). **Journal of Food Engineering**, v. 69, p. 375-379, 2005.
- PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rate of air drying shelled corn in thin-layers**. 1949. M. S. Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1949.
- PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S.; STRUMILLO, C. Theory and application of vibrated beds and vibrated fluid beds for drying process. In: MUJUMDAR, A. S. (ed.). **Advances in Drying**, v. 3, Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1984; 245-306.
- PANCHARIYA, P. C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A. L. Thin-layer modelling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 52, p. 349-357, 2002.
- PAPADAKIS, S. E. et al. Correlations for the equilibrium moisture content of solids. **Drying Technology**, v. 11, n. 3, p. 543-553, 1993.
- PARK, K. J.; VOHNIKOVA, Z.; BROD, F. P. R. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). **Journal of Food Engineering**, v. 51, p. 193-199, 2002.
- PELEG, M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. **Journal of Food Process Engineering**, v. 16, p. 21-37, 1993.
- PERAZZINI, H.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Moisture diffusion prediction of solid wastes drying in thin layer. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM (IDS2012), 18., 11-15

nov. 2012, Xiamen, China. **Conference Proceedings of the 18th International Drying Symposium**. Xiamen, China, 2012, p. 1-8. 1 CD-ROM.

PEREIRA, A. V. **Caracterização e secagem de sementes de painço (*Setaria italica* L.)**. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2010.

PIETROBON, C. L. R. **Desenvolvimento de sistemas para a determinação da condutividade térmica**. 1988. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 1988.

PIN, K. Y. et al. Drying of betel leaves (*Piper betle* L.): quality and drying kinetics. **Drying Technology**, v. 27, p. 149-155, 2009.

PHOUNGCHANDANG, S.; SRINUKROH, W.; LEENANON, B. Kaffir lime leaf (*Citrus hystrix* DC.) drying using tray and heat pump dehumidified drying. **Drying Technology**, v. 26, p. 1602-1609, 2008.

PRADO, M. M. **Secagem em leito fixo de sementes com mucilagem**. 2004. 162 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2004.

POTISATE, Y.; PHOUNGCHANDANG, S. Chlorophyll retention and drying characteristics of ivy gourd leaf (*Coccinia grandis* Voigt) using tray and heat pump-assisted dehumidified air drying. **Drying Technology**, v. 28, p. 786-797, 2010.

RADÜNZ, L. L. **Efeito da temperatura do ar de secagem no teor e na composição dos óleos essenciais de guaco (*Mikania glomerata* Sprengel) e hortelã-comum (*Mentha x villosa* Huds)**. 2004. 90 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

RADÜNZ, L. L. et al. Efeitos da temperatura do ar de secagem sobre a qualidade do óleo essencial de alecrim pimenta (*Lippia sidoides* Cham). **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 9-13, 2002.

RAHIMMALEK, M.; GOLI, S. A. H. Evaluation of six drying treatments with respect to essential oil yield, composition and color characteristics of *Thymys daenensis* subsp. *daenensis*. Celak leaves. **Industrial Crops and Products**, v. 42, p. 613-619, 2013.

RAMALLO, L. A. et al. Moisture diffusivity, shrinkage, and apparent density variation during drying of leaves at high temperatures. **International Journal of Food Properties**, v. 4, p. 163-170, 2001.

REINA, J.; VELO, E.; PUIGJANER, L. Predicting the minimum fluidization velocity of polydisperse mixtures of scrap-wood particles. **Powder Technology**, v. 111, p. 245-251, 2000.

RIBEIRO, P. G. F.; DINIZ, R. C. **Plantas aromáticas e medicinais: cultivo e utilização**. Londrina, PR: IAPAR, 2008. 218 p.

- SERENOTTI, F. **Avaliação da secagem para redução de volume e inativação de microorganismos em lodo de ETE**. 2009. 181 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2009.
- SHAH, R. M.; GOYEL, S. K. Drying characteristics of tea fluidized on a vibrating bed (Part I). In: MUJUMDAR, A. S. (ed.). **Drying' 80**, Washington: Hemisphere Publishing Corporation, v. 2, p. 176-181, 1980.
- SHITTU, T. A.; RAJI, A. O. Thin layer drying of African breadfruit (*Treculia Africana*) seeds: modeling and rehydration capacity. **Food Bioprocess Technol**, v. 4, p. 224-231, 2011.
- SILVA, F. **Avaliação do teor e da composição química do óleo essencial de plantas medicinais submetidas a processos de secagem e armazenamento**. 2005. 152 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005.
- SILVA, F.; CASALI, V. W. D. **Plantas medicinais e aromáticas: pós-colheita e óleos essenciais**. Viçosa, MG: Arte e Livros, 2000. 135 p.
- SILVA, C. C.; DEVILLA, I. A. Higroscopia das folhas de louro (*Lauro nobilis* L.). In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UEG, 3., 2005, Anápolis, GO. **Anais do III Seminário de Iniciação Científica e I Jornada de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Estadual de Goiás**, p. 1-6. Disponível em: <<http://www.prp.ueg.br/06v1/conteudo/pesquisa/inic-cien/eventos/sic2005/arquivos/agrarias/higroscopia.pdf>>. Acesso em jan. 2010.
- SINGH, K. K.; GOSWAMI, T. K. Thermal properties of cumin seed. **Journal of Food Engineering**, v. 45, p. 181-187, 2000.
- SINGULANI, R. C. **Análise teórico-experimental do escoamento de ar em leito fixo**. 2001. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2001.
- SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à termodinâmica da engenharia química**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 626 p.
- SOYSAL, Y.; ÖZTEKIN, S. Equilibrium moisture content equations for some medicinal and aromatic plants. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 74, p. 317-324, 1999.
- SRIKIATDEN, J.; ROBERTS, J. S. Moisture transfer in solid food materials: a review of mechanisms, models, and, measurements. **International Journal of Food Properties**, v. 10, p. 739-777, 2007.
- STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design**. New York: Gordon and Breach Science, 1986. 448 p. (Topics in chemical engineering).
- STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z. Drying of granular products in vibrofluidized beds. In: MUJUMDAR, A. S. (ed.). **Drying'80**, Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. p. 211-226.

-
- TARHAN, S. et al. Product quality and energy consumption when drying peppermint by rotary drum dryer. **Industrial Crops and Products**, v. 32, p.420-427, 2010.
- TAYLOR, M. A. Quantitative measures for shape and size of particles. **Powder Technology**, v. 124, p. 94-100, 2002.
- TEMPLE, S. J.; VAN BOXTEL, A. J. B. Fluidization of tea. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 74, p.5-11, 1999a.
- TEMPLE, S. J.; VAN BOXTEL, A. J. B. Thin layer drying of black tea. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 74, p.167-176, 1999b.
- THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying – a new model. **Transactions of the ASAE**, v. 11, p. 582-586, 1968.
- URIBE, E. et al. Moisture adsorption and desorption isotherms of aloe vera (*Aloe barbadensis Miller*) and determination of sorption heat. **International Journal of Food Engineering**, v. 4, p.1-17, 2008.
- VERMA, R. S.; SAXENA, S. C. Hydrodynamic and heat transfer characteristics of large agricultural seeds-air fluidized beds. **Powder Technology**, v. 39, p. 245-248, 1984.
- VIEIRA, G. N. A. **Caracterização e secagem de grãos de linhaça marrom (*Linum usitatissimum* L.) em leito fixo e fluidizado**. 2012. 67 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2012.
- WEN, C. Y.; YU, Y. H. A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity. **American Institute of Chemical Engineers Journal**, v. 12, n. 3, p. 610-612, 1966.
- YU, A. B.; STANDISH, N. Characterisation of non-spherical particles from their packing behaviour. **Powder Technology**, v. 74, p. 205-213, 1993.
- ZAITSEV, E. D.; REDEKOP, V. I.; SHVETSOV, V. V. Hydrodynamics and external heat exchange of a vibrated fluidized layer of pharmaceutical preparations. **Pharmaceutical Chemistry Journal**, v. 10, n. 3, p. 354-358, 1976.
- ZANOELO, E. F. Equilibrium moisture isotherms for mate leaves. **Biosystems Engineering**, v. 92, n. 4, p. 445-452, 2005.
- ZANOELO, E. F.; DI CELSO, G. M.; KASKANTZIS, G. Drying kinetics of mate leaves in a packed bed dryer. **Biosystems Engineering**, v. 96, n. 4, p. 487-494, 2007.
- ZANOELO, E. F. A theoretical and experimental study of simultaneous heat and mass transport resistances in a shallow fluidized bed dryer of mate leaves. **Chemical Engineering and Processing**, v. 46, p. 1365-1375, 2007.
- ZANOELO, E. F.; BENINCÁ, C.; RIBEIRO, E. Thermophysical properties of mate leaves: experimental determination and theoretical effect of moisture content. **Journal of Food Process Engineering**, v. 34, p. 2124-2136, 2011.

ZHANG, W. et al. Relationship between packing structure and porosity in fixed beds of equilateral cylindrical particles. **Chemical Engineering Science**, v. 61, p. 8060-8074, 2006.

ZHANG, Y.; WANG, Z. Influence of drying methods on chemical composition of the essential oil of *Glechome longituba*. **Chemistry of Natural Compounds**, v. 43, n. 5, p. 625-628, 2007.

ZHONG, W. et al. Fluidization of biomass particles in a gas-solid fluidized bed. **Energy & Fuels**, v. 22, p. 4170-4176, 2008.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B. Effective moisture diffusivity estimation from drying data. A comparison between various methods of analysis. **Drying Technology**, v. 14, p. 1543-1573, 1996.

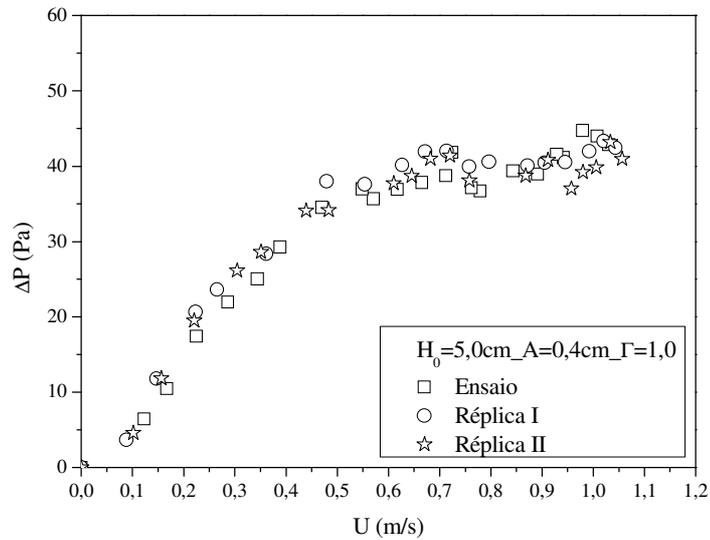
ZOTIN, M. F. Z. **O efeito de parede em colunas de recheio**. 1985. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 1985.

ZOU, R. P.; YU, A. B. Evaluation of the packing characteristics of mono-sized non-spherical particles. **Powder Technology**, v. 88, n. 1, p. 71-79, 1996.

APÊNDICE

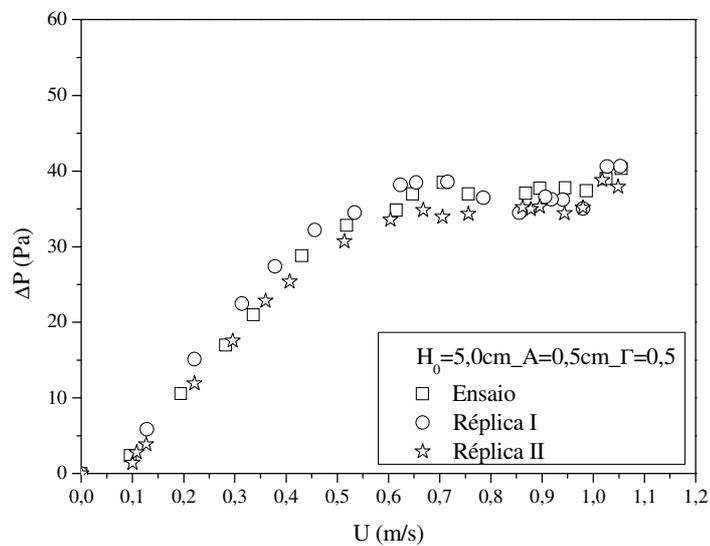
Representação gráfica das curvas de ΔP em função de U para os ensaios fluidodinâmicos em leito vibro-aerado.

Figura A.1 – Leito ‘vibro-aerado’; Queda de pressão no leito em função de U ; Folhas inteiras de manjeriço; $H_0=5,0\text{cm}$; $A=4,0\times 10^{-3}\text{m}$; $\Gamma=1,0$.



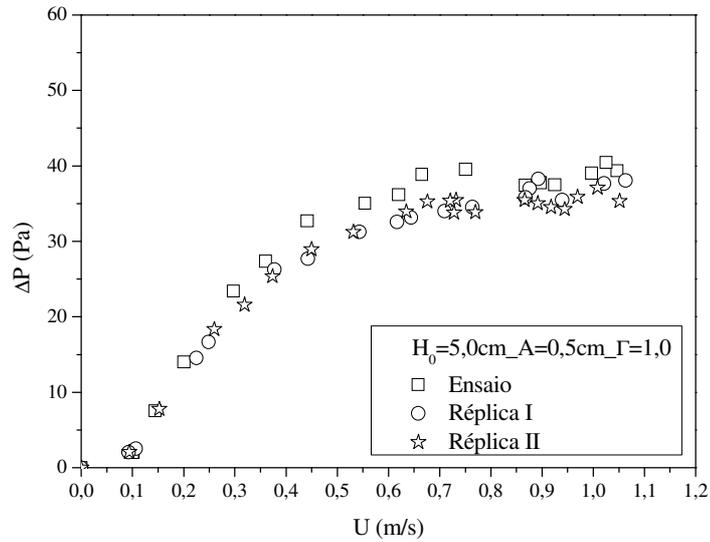
Fonte: Acervo pessoal.

Figura A.2 – Leito ‘vibro-aerado’; Queda de pressão no leito em função de U ; Folhas inteiras de manjeriço; $H_0=5,0\text{cm}$; $A=5,0\times 10^{-3}\text{m}$; $\Gamma=0,5$.



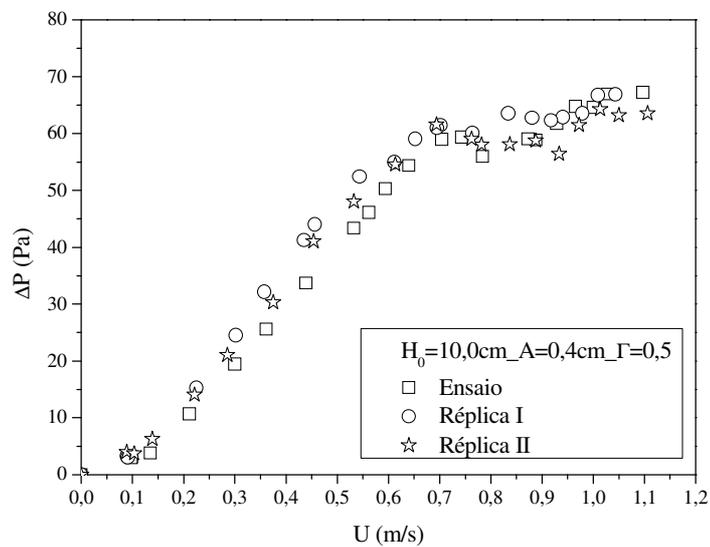
Fonte: Acervo pessoal.

Figura A.3 – Leito ‘vibro-aerado’; Queda de pressão no leito em função de U; Folhas inteiras de manjeriço; $H_0=5,0\text{cm}$; $A=5,0\times 10^{-3}\text{m}$; $\Gamma=1,0$.



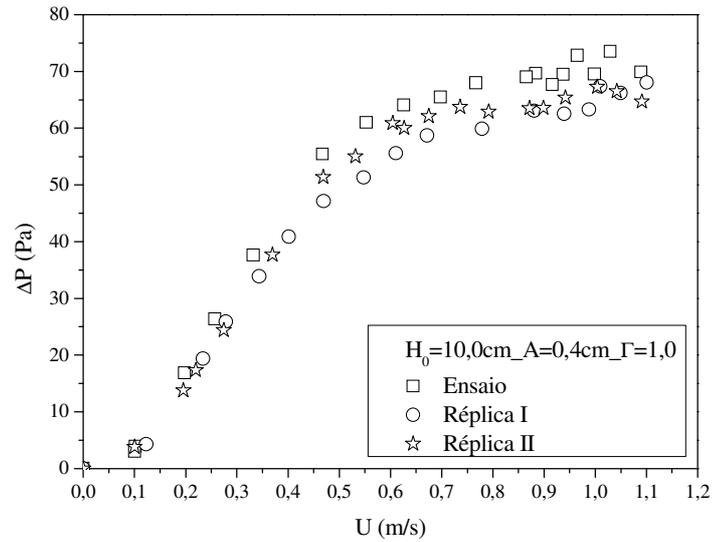
Fonte: Acervo pessoal.

Figura A.4 – Leito ‘vibro-aerado’; Queda de pressão no leito em função de U; Folhas inteiras de manjeriço; $H_0=10,0\text{cm}$; $A=4,0\times 10^{-3}\text{m}$; $\Gamma=0,5$.



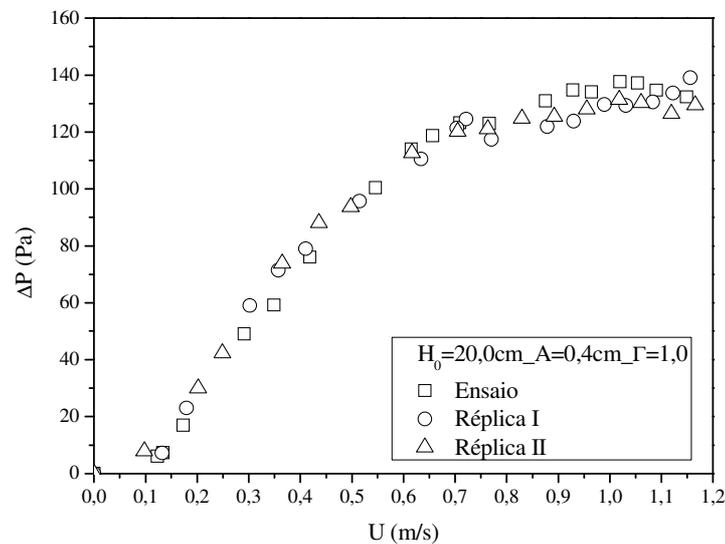
Fonte: Acervo pessoal.

Figura A.5 – Leito ‘vibro-aerado’; Queda de pressão no leito em função de U ; Folhas inteiras de manjeriço; $H_0=10,0\text{cm}$; $A=4,0\times 10^{-3}\text{m}$; $\Gamma=1,0$.



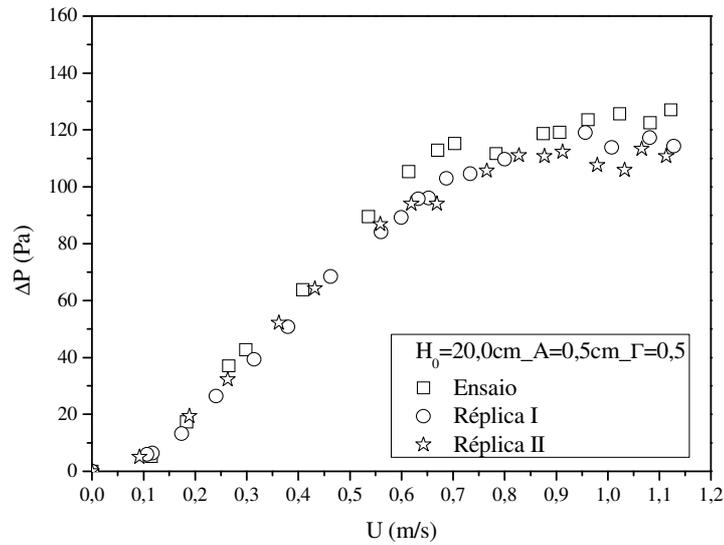
Fonte: Acervo pessoal.

Figura A.6 – Leito ‘vibro-aerado’; Queda de pressão no leito em função de U ; Folhas inteiras de manjeriço; $H_0=20,0\text{cm}$; $A=4,0\times 10^{-3}\text{m}$; $\Gamma=1,0$.



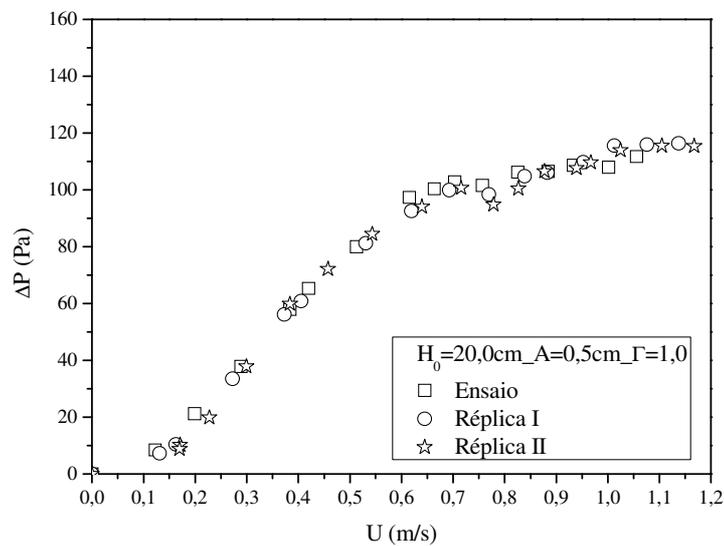
Fonte: Acervo pessoal.

Figura A.7 – Leito ‘vibro-aerado’; Queda de pressão no leito em função de U; Folhas inteiras de manjeriço; $H_0=20,0\text{cm}$; $A=5,0\times 10^{-3}\text{m}$; $\Gamma=0,5$.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura A.8 – Leito ‘vibro-aerado’; Queda de pressão no leito em função de U; Folhas inteiras de manjeriço; $H_0=20,0\text{cm}$; $A=5,0\times 10^{-3}\text{m}$; $\Gamma=1,0$.



Fonte: Acervo pessoal.