

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS
ALUNO: JOSÉ RILDO DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SECAGEM PARA GRÃOS, EM
CAMADA FINA E ESPESSA: COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS
MATEMÁTICOS DE SIMULAÇÃO PARA GRÃOS DE FEIJÃO-MACÁÇAR**
(Vigna unguiculata (L.) Walpers)

Campina Grande, novembro de 2006

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SECAGEM PARA GRÃOS, EM
CAMADA FINA E ESPESA: COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS
MATEMÁTICOS DE SIMULAÇÃO PARA GRÃOS DE FEIJÃO-MACÁÇAR
(*Vigna unguiculata (L.) Walpers*)**

JOSÉ RILDO DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SECAGEM PARA GRÃOS, EM
CAMADA FINA E ESPESSA: COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS
MATEMÁTICOS DE SIMULAÇÃO PARA GRÃOS DE FEIJÃO-MACÁÇAR
(*Vigna unguiculata (L.) Walpers*)**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

Área de concentração: Secagem e Processamento de Produtos Agrícolas.

Orientador: Prof. Dr. MÁRIO EDUARDO R. M. CAVALCANTI MATA

Orientadora: Profa. Dra. MARIA ELITA DUARTE

Campina Grande, PB

2006

JOSÉ RILDO DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SECAGEM PARA GRÃOS, EM
CAMADA FINA E ESPESSA: COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS
MATEMÁTICOS DE SIMULAÇÃO PARA GRÃOS DE FEIJÃO-MACÁÇAR
(*Vigna unguiculata (L.) Walpers*)**

Tese defendida e aprovada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Mário Eduardo R. M. Cavalcanti Mata – Orientador

Prof.^a. Dra. Maria Elita Duarte – Orientadora

Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Prof. Dr. José Helvecio Martins

Prof. Dr. Romeu Fioreze

As minhas filhas Marina e Natália.

AGRADECIMENTOS:

À Universidade Federal da Paraíba e a Universidade Federal de Campina Grande, pela liberação e apoio recebido para realização deste trabalho.

À Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, pela compreensão.

Aos colegas da Oficina Mecânica pela ajuda na construção do secador.

Aos colegas e professores do programa de Doutorado, pelo companheirismo.

Aos meus familiares pela tolerância e incentivos recebidos.

Aos orientadores, Prof. Dr. Mário Eduardo R. M. Cavalcanti Mata e Prof^a. Dra. Maria Elita Duarte, pela paciência e disponibilidade para orientação deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

NOMENCLATURA

RESUMO

ABSTRACT

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Aspectos gerais da cultura.....	4
2.1.1	Origem e evolução, classificação botânica e morfológica.....	4
2.1.2	Composição química e valor nutritivo.....	5
2.1.3	Produção e produtividade nacional.....	5
2.2	Secagem.....	7
2.2.1	Princípios de secagem.....	7
2.2.1.1	Período com taxa de secagem constante.....	8
2.2.1.2	Período com taxa de secagem decrescente.....	8
2.2.2	Teoria de secagem.....	9
2.2.2.1	Teoria de difusão líquida.....	9
2.2.2.2	Teoria de vaporização-condensação.....	11
2.2.2.3	Teoria capilar.....	11
2.2.2.4	Teoria de Luikov.....	12
2.2.2.5	Teoria de Fortes e Okos.....	13
2.2.2.6	Teoria de Philip e De Vries.....	15
2.2.2.7	Teoria de Krischer's, Berger e Pei.....	15
2.2.3	Equações de secagem em camadas finas.....	16
2.2.3.1	Aplicações de modelos de equações de secagem em camadas finas. .	18
2.2.4	Secagem em leito fixo.....	19
2.2.5	Secagem em camada espessa.....	19
2.2.6	Parâmetros de secagem.....	19
2.2.6.1	Equilíbrio higroscópico.....	19

2.2.6.2	Equações de equilíbrio higroscópico.....	20
2.2.6.2.1	Modelo de Kelvin.....	20
2.2.6.2.2	Modelo de Langmuir.....	20
2.2.6.2.3	Modelo de BET.....	21
2.2.6.2.4	Modelo de GAB.....	21
2.2.6.2.5	Modelo de Henderson.....	22
2.2.6.2.6	Modelo de Chung e Pfof modificado.....	22
2.2.6.2.7	Modelo de Cavalcanti Mata.....	22
2.2.6.2.8	Modelo de Oswin modificado.....	22
2.2.6.2.9	Modelo de Halsey modificado.....	23
2.2.6.2.10	Modelo de Henderson-Thompson modificado por Cavalcanti Mata.....	23
2.2.6.2.11	Modelo de Sigma-Copace modificado.....	23
2.2.6.3	Calor latente de vaporização.....	24
2.2.6.4	Calor específico.....	25
2.3	Caracterização física dos grãos.....	26
2.3.1	Massa específica aparente.....	26
2.3.2	Porosidade.....	26
2.3.3	Volume do grão.....	27
2.3.4	Área específica.....	28
2.4	Simulação de secagem em camada espessa.....	28
2.4.1	Modelo de Hukill.....	29
2.4.2	Modelo de Thompson.....	30
2.4.3	Modelo de Michigan.....	34
2.4.3.1	Balanco de energia para o ar.....	35
2.4.3.2	Balanco de energia para o produto.....	35
2.4.3.3	Balanco de massa para o ar.....	36
2.4.3.4	Balanco de massa para o produto.....	36
2.4.4	Modelo de Morey.....	37
2.5	Modelagem matemática.....	38
2.5.1	Método dos volumes finitos.....	39
2.6	Planejamento experimental.....	40

3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1	Matéria-prima.....	41
3.2	Propriedades físicas e parâmetros geométricos do feijão-macáçar.....	41
3.2.1	Teor de água inicial.....	41
3.2.2	Massa específica aparente.....	42
3.2.3	Volume do grão.....	42
3.2.4	Massa específica real.....	43
3.2.5	Área superficial.....	43
3.2.6	Área específica.....	44
3.2.7	Porosidade.....	44
3.2.8	Calor específico.....	44
3.2.8.1	Equipamentos utilizados.....	44
3.2.8.2	Metodologia.....	44
3.2.9	Determinação das curvas de teor de água de equilíbrio.....	45
3.2.9.1	Equipamentos utilizados.....	45
3.2.9.2	Procedimento experimental.....	46
3.2.10	Calor latente de vaporização.....	47
3.3	Equação de secagem em camada fina.....	48
3.4	Secagem em camada espessa.....	49
3.4.1	Secador.....	49
3.4.2	Equipamentos utilizados durante os experimentos	53
3.4.3	Procedimento experimental durante a secagem do produto.....	53
3.5	Simulação de secagem.....	54
3.5.1	Modelo de Michigan.....	54
3.5.1.1	Método utilizado para resolver o conjunto de equações resultante dos balanços de energia e massa.....	56
3.5.1.2	Tamanho da malha.....	58
3.5.1.3	Propriedades termodinâmicas do ar e da água.....	59
3.5.2	Modelo de Thompson.....	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
4.1	Propriedades físicas e parâmetros geométricos do produto.....	63
4.1.1	Massa específica aparente.....	63

4.1.2	Teor de água de equilíbrio.....	65
4.1.3	Calor latente de vaporização.....	70
4.1.4	Calor específico.....	74
4.2	Equação de secagem em camada fina.....	75
4.2.1	Efeitos das variáveis sobre o valor de 'K'.....	75
4.2.2	Efeitos das variáveis sobre o valor de 'N'.....	76
4.2.3	Efeitos da velocidade do ar sobre a secagem em camada fina do feijão-macáçar.....	77
4.2.4	Efeitos do teor de água inicial sobre a secagem feijão-macáçar.....	80
4.6	Resultados experimentais e estimados da cinética de secagem em camada espessa do feijão-macáçar.....	88
4.6.1	Curvas de secagem do produto com teor médio inicial de água de 21,5 %, base úmida.....	88
4.6.2	Curvas de secagem do produto com teor médio inicial de água de 40 %, base úmida.....	97
4.6.3	Curvas de secagem do produto com teor médio inicial de água de 64 %, base úmida.....	107
4.6.4	Avaliação dos modelos de Michigan e de Thompson.....	113
5	CONCLUSÕES.....	116
6	SUGESTÕES.....	118
7	REFERENCIAIS BIBLIOGRÁFICAS.....	119
8	ANEXOS.....	127

LISTA DE FIGURAS

1	Diagrama esquemático do modelo de Thompson.....	30
2	Volume elementar da camada de grão.....	34
3	Desenho esquemático de um elipsóide genérico.....	43
4	Desenho esquemático com vista superior do secador.....	51
5	Desenho esquemático com vista lateral do secador.....	51
6	Secador em escala laboratorial para secagem em camada espessa e em camada fina.....	52
7	Desenho esquemático em perspectiva da posição da camada de grãos e do fluxo de ar no interior do secador.....	54
8	Esquema numérico e volume de controle.....	56
9	Variação da massa específica aparente do feijão-macáçar em função do seu teor de água.....	64
10	Valores experimentais e preditos pelo modelo de Henderson-Thompson das isotermas de equilíbrio do feijão-macáçar.....	67
11	Valores experimentais e preditos pelo modelo de Henderson-Thompson modificado por Cavalcanti Mata das isotermas de equilíbrio do feijão- macáçar.....	67
12	Valores experimentais e preditos pelo modelo de Oswin modificado das isotermas de equilíbrio do feijão-macáçar.....	68
13	Valores experimentais e preditos pelo modelo de Halsey modificado das isotermas de equilíbrio do feijão-macáçar.....	68
14	Valores experimentais e preditos pelo modelo de Chung-Pfost modificado das isotermas de equilíbrio do feijão-macáçar.....	69
15	Relação entre $\ln(P_v)$ e $\ln(P_{vs})$ para o feijão-macáçar com teor médio de água de equilíbrio variando de 5 a 35 %, base seca.....	72
16	Gráfico de correspondência entre os valores experimentais e os estimados para o calor latente de vaporização do feijão-macáçar.....	73

17	Valores experimentais e estimados do calor específico do feijão-macáçar em função do teor de água.....	74
18	Influência da temperatura, do teor de água inicial e da velocidade do ar de secagem sobre o valor de 'K'.....	76
19	Influência da temperatura, do teor de água inicial e da velocidade do ar de secagem sobre o valor de 'N'.....	77
20	Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 20 %, base úmida, obtidas à temperatura de 40 °C.....	78
21	Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com e teor médio de água inicial de 20 %, base úmida, obtidas à temperatura de 70 °C.....	78
22	Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com e teor médio de água inicial de 65 %, base úmida, obtidas à temperatura de 40 °C.....	79
23	Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com e teor médio de água inicial de 65 %, base úmida, obtidas à temperatura de 70 °C.....	80
24	Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com e teor médio de água inicial de 20 %, base úmida, obtidas à temperatura de 40 °C.....	81
25	Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com e teor médio de água inicial de 65 %, base úmida, obtidas à temperatura de 40 °C.....	81
26	Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com e teor médio de água inicial de 20 %, base úmida, obtidas à temperatura de 40 °C.....	82
27	Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com e teor médio de água inicial de 65 %, base úmida, obtidas à temperatura de 40 °C.....	83
28	Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com e teor médio de água inicial de 20 %, base úmida, obtidas à temperatura de 70 °C.....	84
29	Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com e teor médio de água inicial de 65 %, base úmida, obtidas à temperatura de 70 °C.....	84
30	Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com e teor médio de água inicial de 20 %, base úmida, obtidas à temperatura de 70 °C.....	85
31	Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com e teor médio de água inicial de 65 %, base úmida, obtidas à temperatura de 70 °C.....	85
32	Efeitos do teor de água inicial sobre a taxa de secagem do feijão-macáçar...	86

33	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, temperatura de 50 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.....	89
34	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida.....	89
35	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida.....	90
36	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida.....	90
37	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.....	91
38	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida,.....	91
39	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida.....	92
40	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida.....	92
41	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, temperatura de 70 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.....	93
42	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida.....	93
43	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida.....	94
44	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida.....	94
45	Dados experimentais e estimados da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, temperatura de 50 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.....	96

46	Dados experimentais e estimados da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.....	96
47	Dados experimentais e estimados da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, temperatura de 70 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.....	97
48	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida, temperatura de 50 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.....	98
49	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida.....	98
50	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida.....	99
51	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida.....	99
52	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida, temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.....	100
53	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida.....	100
54	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida.....	101
55	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida.....	101
56	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida, temperatura de 70 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.....	102
57	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida,.....	102

58	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida.....	103
59	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida.....	103
60	Dados experimentais e estimados da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida, temperatura de 50 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.....	105
61	Dados experimentais e estimados da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida, temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.....	106
62	Dados experimentais e estimados da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida, temperatura de 70 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.....	106
63	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 64 %, base úmida, temperatura de 50 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.....	107
64	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 64 %, base úmida, temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.....	108
65	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 64 %, base úmida.....	108
66	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 64 %, base úmida.....	109
67	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 62 %, base úmida, temperatura de 70 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.....	109
68	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 62 %, base úmida,.....	110

69	Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 62 %, base úmida.....	110
70	Dados experimentais e estimados da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 62 %, base úmida, temperatura de 50 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.....	112
71	Dados experimentais e estimados da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 62 %, base úmida, temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.....	112
72	Dados experimentais e estimados da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 62 %, base úmida, temperatura de 70 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.....	113
73	Corte transversal de grãos de feijão-macáçar com teor de água inicial de 65%, base úmida.....	114

LISTA DE TABELAS

1	Produção de feijão no Brasil e na região Nordeste, no período de 1997 a 2001.....	5
2	Área colhida (hectare), produção (tonelada) e produtividade (quilograma/hectare) do feijão-macáçar, por estado, na região Nordeste no período de 1997 a 2001.....	6
3	Matriz de planejamento experimental.....	48
4	Níveis reais e codificados das variáveis estudadas.....	49
5	Valores médios das propriedades físicas e dos parâmetros geométricos do feijão-macáçar.....	63
6	Valores experimentais do teor de água de equilíbrio higroscópico de grãos de feijão-macáçar com teor médio de água inicial médio de 65 % ($\pm 1\%$), base úmida, obtidos por dessorção.....	65
7	Valores dos parâmetros, do coeficiente de determinação (R^2) e do desvio percentual médio (DPM), dos modelos utilizados na análise dos dados experimentais.....	66
8	Valores de umidade relativa de equilíbrio para o feijão-macáçar, em função do teor de água e da temperatura.....	70
9	Valores da pressão de vaporização da água do feijão-macáçar, em função do teor de água e da temperatura.....	70
10	Valores neperiano da pressão de vaporização da água do feijão-macáçar, em função do teor de água e da temperatura estabelecidos.....	71
11	Valores dos coeficientes das retas para determinação do calor latente de vaporização do feijão-macáçar.....	71
12	Calor latente de vaporização da água do feijão-macáçar em função do teor de água e da temperatura estabelecidos.....	72
13	Calor específico do feijão-macáçar em função do teor de água.....	74
14	Valores dos parâmetros da equação de Page obtidos por meio de regressão não linear, em função das temperaturas, dos teores de água e das velocidades do ar de secagem.....	75

15	Desvio percentual médio (DPM) entre os dados experimentais do teor de água médio do feijão-macáçar e os estimados pelos respectivos modelos..	95
16	Desvio percentual médio (DPM) entre os dados experimentais e os preditos pelo modelo de Michigan, da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5%, base úmida.....	97
17	Desvio percentual médio (DPM) entre os dados experimentais do teor de água médio do feijão-macáçar e os estimados pelos respectivos modelos..	104
18	Desvio percentual médio (DPM) entre os dados experimentais e os preditos pelo modelo de Michigan, da temperatura média da camada de grãos em cada camada, durante a secagem do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida.....	105
19	Desvio percentual médio (DPM) entre os dados experimentais do teor de água médio do feijão-macáçar e os estimados pelos respectivos modelos..	111
20	Desvio percentual médio (DPM) entre os dados experimentais e os preditos pelo modelo de Michigan da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 62%, base úmida.....	111

NOMENCLATURA

Letras latinas

A	Área	(m ²)
A _e	Área específica	(m ² /m ³)
a _w	Atividade de água	(decimal)
b ₁	Constante das equações 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 80, 81	(-)
b ₂	Constante das equações 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 80, 81	(-)
b ₃	Constante das equações 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 81, 83	(-)
b ₄	Constante das equações 95, 98,	(-)
b ₅	Constante das equações 95, 98,	(-)
b ₆	Constante das equações 99,	(-)
C	Condutividade térmica	(w/m/K)
C ₁	Constante das equações 26, 27, 28	(-)
c _a	Calor específico do ar	(J/kg.°C)
C _{BET}	Constante de BET	(-)
c _p	Calor específico do produto	(J/kg.°C)
c _v	Calor específico do vapor d'água	(J/kg.°C)
c _w	Calor específico da água	(J/kg.°C)
D	Coefficiente de difusão	(m ² /s)
D ₀	Coefficiente de difusão limite	(m ² /s)
dU/dt	Taxa de secagem	(kg/h)
E	Energia de ativação	(J/kg)
F ₁	Constante da equação 60, 61, 62, 63, 66, 67, 85	(-)
F ₂	Constante da equação 60, 61, 62, 63, 66, 67, 85	(-)
F ₃	Constantes da equação 61, 85	(-)
g	Aceleração da gravidade	(m/s)
h	Altura	(m)
h _{fg} [*]	Calor latente de vaporização da água do produto	(J/kg)
h _c	Coefficiente de transferência de calor convectivo	(w/m ² /K)

h_{fg}	Calor latente de vaporização da água	(J/kg)
h_m	Coefficiente de transferência de massa	(m/s)
J_l	Fluxo de líquido	(kg/m ² .s)
k	Constante das equações 28, 38, 39, 41, 49	(-)
K	Constante das equações 103 e 104	(-)
K_h	Condutividade hidráulica	(s)
m	massa	(kg)
M_a	Peso molecular do ar	(kg/kg.mol)
n	Altura da camada	(m)
N	Constante das equações 103 e 104	(-)
n^*	Numero de camadas do secador	(-)
P	Pressão	(Pa)
P_r	Número de Prandtl	(-)
P_v	Pressão parcial de vapor no ar	(Pa)
P_{vs}	Pressão de vapor de saturação	(Pa)
Q	Vazão de ar	(m ³ /min)
r	Raio	(m)
R_c	Razão de conversão de unidades	(kg/kg)
R_e	Número de Reynolds	(-)
R_o	Constante universal dos gases	(J/kg.mol.K)
RU	Razão de umidade	(kg/kg)
R_v	Constante dos gases para o vapor de água	(J/kg.K)
S	Área superficial	(m ²)
T	Temperatura	(°C)
t	Tempo	(s)
T_{abs}	Temperatura absoluta	(K)
T_{bs}	Temperatura de bulbo seco	(°C)
T_{bu}	Temperatura de bulbo úmido	(°C)
T_{eq}	Temperatura de equilíbrio	(°C)
U	Teor de água	(kg/kg)
U_{bu}	Teor de água em base úmida	(kg/kg)
U_{bs}	Teor de água em base seca	(kg/kg)

U_{cal}	Teor de água calculado	(kg/kg)
U_{eq}	Teor de água de equilíbrio	(kg/kg)
U_{exp}	Teor de água de experimental	(kg/kg)
U_i	Teor de água inicial	(kg/kg)
U_{pred}	Teor de água predito	(kg/kg)
UR	Umidade relativa	(decimal)
V	Volume	(m ³)
v	Velocidade do ar	(m/s)
v_{esp}	Volume específico do ar	(m ³ /kg)
W	Razão de mistura do ar	(kg/kg)
X	Adimensional de profundidade	(-)
Y	Adimensional de tempo	(-)

Letras gregas

∇	Gradiente	(-)
$\partial U / \partial t$	Taxa de difusão	(1/s)
Ψ	Potencial hidráulico capilar	(J/kg)
ρ	Massa específica	(kg/m ³)
μ	Potencial químico	(J/kg)
φ	Fluxo gravitacional	(kg/m ² .s)
σ	Tensão superficial da água	(Pa)
τ	Raio do capilar cilíndrico	(m)
θ	Temperatura do produto	(°C)
v	Quantidade de dados experimentais	(-)

Subscritos

a	ar
abs	absoluta
ap	aparente
cal	calculado
e	especifico
eq	equilíbrio
es	esfera
exp	experimental
f	final
g	grão
h	hidráulica
i	inicial
is	isotérmica
l	líquido
m	massa
p	produto
pred	predito
pr	projetada
ps	produto seco
q	calor
re	real
s	sólido
ss	sólido seco
te	térmica
vo	vapor no estado saturado
vp	vapor
vs	vapor saturado

RESUMO

OLIVEIRA, José Rildo de. **Desenvolvimento de um sistema de secagem para grãos, em camada fina e espessa: comparação entre modelos matemáticos de simulação para grãos de feijão-macáçar (*Vigna unguiculata (L.) Walpers*)**. Campina Grande, 2006, 178. (Tese)

Estudou-se o comportamento das propriedades físicas do feijão-macáçar (*Vigna unguiculata (L.) Walpers*) - porosidade, área superficial, área específica, calor específico, massa específica aparente e isotermas de equilíbrio -, com teor de água inicial de 20, 40 e 65 %, base úmida, os efeitos do teor de água inicial do produto, da temperatura e da velocidade do ar de secagem, sobre a cinética de secagem do produto. As isotermas de equilíbrio do feijão-macáçar com teor de água inicial de 65%, base úmida, foram determinadas pelo método estático, a temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C, com umidade relativas variando de 0,10 a 0,85, decimal. Para análise dos dados experimentais, foram utilizados cinco modelos matemáticos: Henderson-Thompson; modelo de Henderson-Thompson modificado por Cavalcanti Mata; modelo de Chung-Pfost; modelo de Oswin modificado; modelo de Halsey modificado. O estudo da cinética de secagem em camada fina foi feito com temperaturas de 40, 55 e 70 °C, velocidade do ar de secagem de 0,2, 0,5 e 0,8 m/s. Foi ajustado o modelo de Page aos dados experimentais para obter a curva de secagem. Para realizar a parte experimental da secagem foi projetado e construído um secador em escala laboratorial para secagem em camada espessa e em camada fina, simultaneamente, com capacidade para secar oito quilos de grão em camada espessa e um quilo em camada fina. A secagem em camada espessa do produto foi feita a temperaturas de 50, 60 e 70 °C, em camada com espessura de 60 cm e vazão do ar de secagem de 0,59 m³/min. Utilizou-se o modelo proposto por BAKKER-ARKEMA *et al.* (1974) - Modelo da Universidade Estadual de Michigan (M.S.U.) – e o modelo de Thompson para simular o processo de secagem. A discretização das equações diferenciais foi feita pelo método dos volumes finitos, utilizando-se uma formulação explícita e a função de interpolação espacial “upwind”.

Palavras-chave: feijão-macáçar, secagem, modelo matemático, secador de leito fixo.

ABSTRACT

OLIVEIRA, José Rildo de. **Development of a system of drying for grain, in thin-layer and fixed-bed: comparison between mathematical models of simulation for grain cowpea (*Vigna unguiculata (L.) Walpers*).** Campina Grande, 2006, 178p. (Thesis)

The behavior of cowpea bean's physical properties was studied (*Vigna unguiculata (L.) Walpers*) - porosity, surface area, specific area, specific heat, bulk density and the relative equilibrium humidity, - with initial moisture content range 20, 40 and 65 %, wet basis, the initial moisture effects content the product, the temperature and the air drying speed , on kinetic of product drying. The relative equilibrium humidity of cowpea bean with initial moisture content range 65 %, wet basis, had been determined by the static method, for temperatures of 20, 30, 40 and 50 °C, with relative humidity varying between 0,10 and 0,85, decimal. For experimental data's analysis, five mathematical models had been used: Henderson-Thompson's; Henderson-Thompson's model modified by Cavalcanti Mata; Chung-Pfost's model; Oswin's modified model; Halsey's modified model. The study of the drying kinetic in thin-layer was made with temperatures of 40, 55 and 70 °C, air drying speed of 0,2, 0,5 and 0,8 m/s. The Page's model was adjusted to the experimental data to get the drying curve. To carry through the drying experimental part was projected and build a drier in laboratorial scale for fixed-bed drying and thin-layer , simultaneously, with capacity to dry eight kilos of grain in thick layer and one kilo in fine layer. The fixed-bed drying of the product was made with temperatures of 50, 60 and 70 °C, in layer with thickness of 60 cm and air outflow of 0,59 drying of m³/min. The considered BAKKER-ARKEMA's *et al* (1974) model was used. - Model of the Michigan State University (M.S.U.) - and Thompson's model to simulate the drying process. Discretization of the differential equations was made by the finite volumes method, using an explicit formularization and the function of upwind space interpolation.

Keywords: cowpea bean, drying, mathematical model, drying fixed-bed.

1 – INTRODUÇÃO

Até o começo do século XIX, a população mundial era de um bilhão de pessoas, na metade do século XX já atingiu três bilhões, e a partir de 1960, a população dobrou em menos de quarenta anos. Atualmente, a população mundial é de seis bilhões de habitantes. Essa explosão demográfica se verifica, sobretudo, nos países mais pobres, onde a produção de alimentos está muito aquém do necessário para sustentar as populações. Esse é o primeiro grande desafio que a sociedade atual tem pela frente.

A expansão da atividade agrícola para zonas virgens, praticamente estagnou a partir dos anos setenta, em âmbito mundial. Isso significa que para atender a demanda por alimentos para todo esse contingente populacional, tem-se que investir em novas tecnologias. Esse é o segundo desafio que a humanidade deve enfrentar nesse milênio que se inicia.

A produção brasileira de grãos no ano de 2001 foi um pouco mais de 98 milhões de toneladas, sendo o feijão o terceiro em área média plantada e o quarto mais cultivado, com uma produção média de 2,7 milhões de toneladas, no período entre 1997 e 2001. Segundo YOKOYAMA *et al.* (1996), as estatísticas da FAO em 1993 mostram que, considerando todos os gêneros e espécies de feijão, o Brasil é o segundo maior produtor mundial de feijão, perdendo apenas para a Índia. Levando-se em consideração apenas o gênero *Phaseolus*, o Brasil é o maior produtor do mundo, seguido do México. Segundo dados do IBGE (Levantamento Sistemático da Produção Agrícola, 1993 a 1997), o gênero *Vigna* representa cerca de 17 % da produção total de feijão do Brasil, e 48 % da produção total de feijão da região Nordeste, sendo, o estado da Paraíba o quinto maior produtor.

O feijão-macáçar (*Vigna unguiculata (L) Walpers*) é uma leguminosa de excelente sabor e valor nutritivo. Nos restaurantes típicos das regiões Norte e Nordeste, é o acompanhamento indispensável de diversos pratos da culinária regional, podendo ser consumido na forma de vagem verde, grão verde e grão seco. Na cozinha baiana é a principal matéria-prima no preparo do acarajé.

Por ser uma cultura bem adaptada ao clima seco, comumente, o feijão-macáçar é plantado posteriormente à colheita do feijão *Phaseolus*. Parte da produção é consumida ainda verde e a outra parte da produção, que se destina ao consumo posterior,

permanece no campo por um período de tempo maior para ser colhido com teor de água na ordem de 20 a 30 %.

Em virtude do alto teor de água dos grãos recém colhidos, a secagem constitui-se em uma das operações de suma importância dentre as técnicas envolvidas na conservação das qualidades desejáveis aos produtos agrícolas.

As teorias propostas para descrever a movimentação de líquidos no interior dos produtos de origem biológica têm servido de base para a construção de modelos matemáticos que, na maioria dos casos, representa de forma satisfatória o fenômeno da secagem. Independente da sofisticação do modelo seja ele composto de um conjunto de expressões algébricas ou de equações diferenciais, sua eficiência depende, basicamente, de três fatores:

- a) escolha correta das variáveis que tem maior influência no comportamento do problema em estudo, essas variáveis devem ser incorporadas as equações, as menos importantes são relevadas, para isso, é necessário se ter uma avaliação qualitativa do comportamento do sistema;
- b) precisão nos valores dos parâmetros experimentais, a confiabilidade dos resultados fornecidos pelas equações depende do grau de exatidão das variáveis contidas nessas equações;
- c) método utilizado na solução do conjunto de equações que representa o fenômeno físico, especificamente, quando se trabalha com sistema de equações diferenciais.

Com o desenvolvimento de processadores cada vez mais velozes e com o domínio sobre as variáveis que influenciam diferentes processos, o potencial dos modelos matemáticos vem crescendo sistematicamente, fazendo com que seja possível trabalhar-se com margens de erro cada vez menores, sem deixar de levar em consideração que em qualquer modelo, sempre vai existir a possibilidade de ocorrência de fatores não previsíveis.

Além das vantagens técnicas, a simulação de processos reduz os custos das pesquisas, uma vez que possibilita a realização de experimentos com maior margem de segurança. Igualmente, a redução no tempo de execução do projeto, o desperdício de

materiais e, a contenção nos gastos com mão-de-obra na execução de um processo real, são condições desejáveis para o bom delineamento da pesquisa.

O aprimoramento matemático desses modelos irá favorecer:

- a elaboração de programas que simulem melhor os fenômenos da secagem e do armazenamento de produtos;
- a determinação dos parâmetros das equações de secagem;
- a solução de sistemas de equações com melhor grau de precisão;
- a modelagem matemática do fenômeno de difusão de calor e massa no interior dos produtos;
- a elaboração de projetos de secadores com melhor desempenho.

Assim sendo, o presente trabalho tem os seguintes objetivos:

- determinar experimentalmente os parâmetros físicos – porosidade, massa específica aparente e real, volume, área específica e superficial, calor latente de vaporização, calor específico, isotermas de equilíbrio, – necessários à secagem dos grãos de feijão-macáçar;
- estudar a cinética de secagem em camada fina evidenciando os efeitos da temperatura, da velocidade do ar de secagem e do teor de água inicial dos grãos;
- estudar as isotermas de equilíbrio nas temperaturas de 20, 30, 40, e 50 °C;
- desenvolver um sistema de secagem, para grãos, em camada fina e espessa e, especificamente, testar esse sistema na secagem de feijão-macáçar;
- utilizar o modelo matemático da Universidade Estadual de Michigan (M.S.U.) proposto por BAKKER-ARKEMA *et al.* (1974), e o modelo de Thompson *et al.* (1968), para simular a secagem em camada espessa (leito fixo) do feijão-macáçar, com a finalidade de avaliar a eficiência de cada modelo.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Aspectos gerais da cultura

2.1.1 - Origem e evolução, classificação botânica e morfológica

No Brasil, as variedades de feijão-macáçar são da espécie *Vigna*, introduzidas pelos primeiros colonizadores portugueses. A palavra macáçar (macassar ou makassar) tem sua origem na ilha deste nome, possessão portuguesa do oriente onde é hoje a República da Indonésia. Sua origem é bastante controversa, sendo aceito atualmente, como originário da África, tendo sido domesticado nos sistemas agrícolas compostos pelo sorgo e o milheto, predominantes nas regiões semi-áridas do Oeste da África (ARAÚJO *et al.*, 1984).

O feijão-macáçar tem a seguinte classificação botânica: classe: *Dicotiledônea*, ordem: *Rosales*, família: *Leguminosae*, subfamília: *Papilionoideae*, gênero: *Vigna*, espécie: *Vigna unguiculata* (L) Walpers. É conhecido na região Nordeste como feijão-de-corda, feijão-macáçar, feijão-verde, feijão-manteiga, feijão-fradinho, feijão-caupi. Na região Norte é conhecido como feijão-de-praia, feijão-da-colônia, feijão-de-vara, feijão-caupi, ou simplesmente, caupi. CALEGARI (1995) afirma que, nos países tropicais, existem mais de duzentas variedades da espécie *Vigna*.

Segundo ARAÚJO *et al.* (1984) e CALEGARI (1995), sua germinação é epigéia, ou seja, os cotilédones, depois da emergência, situam-se acima do solo. O sistema radicular é formado por uma raiz principal, pivotante, com ramificações laterais. As raízes, principais e laterais, podem crescer mais de dois metros, em busca de água e nutrientes. As vagens variam em forma, cor, tamanho e número de sementes, possuindo de 100 a 200 mm de comprimento. Os grãos medem de 6 a 12 mm e possuem tegumento liso ou rugoso, podem ser de coloração branca, marrom, preta, mulatinho, vermelha, branca com olho (círculo ao redor do hilo) preto, branca com olho castanho, bicolor marmorizado, bicolor pontilhado, bicolor malhado e tricolor.

Por ser uma cultura adaptada ao clima tropical, pode ser cultivada no Brasil, tanto no clima seco da região Nordeste, como no clima úmido da região Norte. A temperatura do ar, mais adequada ao seu desenvolvimento, situa-se na faixa de 20 a 35 °C. As temperaturas inferiores a 18 °C afetam diretamente o desenvolvimento vegetativo e desestimulam o início da floração, aumentando consideravelmente o ciclo da planta (ARAÚJO *et al.*, 1984).

2.1.2 – Composição química e valor nutritivo

De acordo com SILVA *et al.* (1999b), de uma maneira geral, os grãos dessa cultura são ricos em proteínas, carboidratos e outros nutrientes. Suas proteínas são de alto valor nutritivo, ricas em lisina e outros aminoácidos essenciais, com exceção dos aminoácidos sulfurados metionina e cisteína. A autora avaliou a composição química de grãos de oito genótipos de feijão-caupi, e obteve os seguintes resultados expressos em percentagem de peso seco: proteína total de 22,43 a 29,29 %; carboidratos de 51,09 a 62,62 %; lipídio total de 0,97 a 2,01 %; cinza de 3,14 a 3,70 %. O teor de proteína solúvel variou de 66,48 a 90,88 miligramas de proteína por grama de farinha.

Por ser uma leguminosa de excelente valor nutritivo, o feijão-macáçar constitui-se em uma das mais importantes fontes de proteína na alimentação humana, tanto das populações rurais quanto das urbanas nas regiões Norte e Nordeste do país. Na culinária nordestina é consumido na forma de vagem verde, grão verde e grão seco, além de outras formas de preparo, como o acarajé, por exemplo. ARAÚJO *et al.* (1984) destacam a sua utilização como forragem verde, feno, ensilagem, pastagem, farinha para alimentação animal e, ainda, na rotação de culturas e adubação verde.

2.1.3 – Produção e produtividade nacional

Segundo dados do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), o feijão-macáçar representa cerca de 17 % da produção total de feijão do Brasil, e 48 % da produção total de feijão da região Nordeste, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Produção de feijão no Brasil e na região Nordeste, no período de 1997 a 2001.

Ano	Produção total de feijão (tonelada)		Região Nordeste (%)	Produção total do Nordeste (tonelada)		Produção de feijão-macáçar (%)	
	Brasil	Nordeste	(%)	comum	macáçar	Brasil	Nordeste
1997	2.840243	1.026.190	36,0	471.728	554.462	19,5	54,0
1998	2.191153	420.334	19,2	288.459	131.875	6,0	31,4
1999	2.830915	771.799	27,0	345.958	425.841	15,0	55,2
2000	3.056289	1.132.213	37,0	574.612	557.301	18,2	49,2
2001	2.453681	531.104	21,0	308.826	222.278	9,0	41,8

Fonte: IBGE - Levantamento Sistemático da Produção Agrícola de 1997 a 2001

Destacam-se os Estados do Ceará e Piauí como os dois maiores produtores e os que possuem as maiores áreas cultivadas, com média de 300.000 hectares/ano. A produtividade média está na faixa de 300 a 350 quilogramas/hectare, conforme Tabela 2. Segundo VIEIRA *et al.* (2000), em canteiros experimentais, a produtividade média de dois cultivares (EPACE-6 e CNC 434) foi de 2.522 e 1.681 quilogramas/hectare, respectivamente.

Tabela 2 - Área colhida (hectare), produção (tonelada) e produtividade (quilograma/hectare) do feijão-macáçar, por estado, na região Nordeste no período de 1997 a 2001.

Estado/ Região	Parâmetro	Anos				
		1997	1998	1999	2000	2001
Maranhão	Área	110.444	66.175	60.978	70.085	71.104
	Produção	47.702	18.054	25.996	31.756	36.264
	Produtividade	432	272	426	453	470
Piauí	Área	305.782	193.680	218.836	207.617	71.104
	Produção	84.877	18.242	70.559	61.855	36.264
	Produtividade	277	94	322	298	470
Ceará	Área	504.282	350.904	558.035	552.943	498.143
	Produção	151.386	55.304	184.023	192.567	84.372
	Produtividade	300	157	330	348	169
R. G. do Norte	Área	161.566	20.661	53.144	86.436	33.836
	Produção	63.059	7.241	14.998	42.332	8.112
	Produtividade	390	350	282	490	240
Paraíba	Área	172.314	7.306	35.867	123.326	18.072
	Produção	71.461	2.121	9.431	62.001	6.599
	Produtividade	415	290	263	502	365
Pernambuco	Área	199.451	28.561	140.000	174.467	94.107
	Produção	81.079	7.283	35.000	56.937	15.670
	Produtividade	407	255	250	326	166
Sergipe	Área	4.005	3.169	3.550	-	-
	Produção	2.025	1.524	1.902	-	-
	Produtividade	506	481	536	-	-
Bahia	Área	120.792	108.347	163.702	192.060	135.651
	Produção	52.873	22.106	83.932	109.853	41.805
	Produtividade	438	204	513	572	308
Nordeste	Área	1.578.636	778.803	1.234.112	1.407.114	1.057.628
	Produção	554.462	131.875	425.841	557.301	222.278
	Produtividade	343	169,3	345,1	396,1	210,1

Fonte: IBGE - Levantamento Sistemático da Produção Agrícola de 1997 a 2001

2.2 – Secagem

2.2.1 – Princípios de secagem

A água está ligada de diferentes formas na estrutura orgânica dos grãos: parte da água encontra-se adsorvida na superfície sem qualquer ligação com o produto; outra parte está ligada ao produto por meio das forças físicas (forças de Van der Waals), que ocorrem entre moléculas de água, caracterizando-se como forças fracas por não estarem ligadas às cadeias carbônicas; finalmente, há a água que se encontra fortemente ligada às cadeias carbônicas sendo que, nesse caso, as condições ambientais não são suficientes para retirá-la, sendo necessário submeter o produto a temperatura acima de 100 °C (FIOREZE, 2004).

A redução do teor de água de forma a garantir o armazenamento dos grãos por um determinado tempo, em condições seguras, é feita por meio do processo de secagem, natural ou artificial. Essa operação, quando bem conduzida garante a conservação das qualidades nutricionais e organolépticas dos grãos.

A secagem é definida como um processo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, que pode ser realizada por convecção ou por condução. Na secagem de grãos a transferência de calor por convecção é a forma mais utilizada. A transferência de calor ocorre devido à diferença de temperatura existente entre o ar de secagem (geralmente mais quente) e o produto. A diferença de pressão parcial de vapor de água entre o ar e a superfície do produto, ocasiona a transferência de massa para o ar de secagem, em forma de vapor de água.

Durante um processo de secagem, é imprescindível o conhecimento das variáveis inerentes ao produto e de outras, próprias do ar de secagem, tais como: teor de água inicial e final do produto, teor de umidade de equilíbrio, coeficiente de difusão de massa, calor latente de vaporização da água do produto, calor específico, temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem e umidade relativa do ar ambiente.

A secagem de produtos biológicos pode compreender dois períodos distintos: período com taxa de secagem constante, e um ou mais períodos com taxa de secagem decrescente.

2.2.1.1 – Período com taxa de secagem constante

Esse fenômeno pode ser observado em produtos para os quais a resistência interna ao transporte de água é muito menor que a resistência externa para a remoção do vapor de água na superfície do produto. Durante essa fase, a superfície do produto atinge rapidamente a temperatura de bulbo molhado do ar e permanece constante com esse valor enquanto existir a película de água na superfície. Conforme o produto vai secando, em sua superfície vão aparecendo regiões não cobertas pela película de água. O teor de água no qual a taxa de secagem passa de constante para decrescente é chamado de teor de água crítico, e seu valor depende das características do produto, tais como tamanho e forma, e das condições de secagem (QUEIROZ *et al.*, 1987; BROOKER *et al.*, 1992).

A taxa de secagem constante de produtos biológicos pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{h_m A}{R_v T_{abs}} (P_{vs} - P_v) = \frac{h_c A}{h_{fg}} (T_{bs} - T_{bu}) \quad (1)$$

Os coeficientes da Equação 1 são função da espessura do filme de ar que envolve o produto na secagem, sendo, dessa forma, afetados tanto pela velocidade do ar de secagem como pelo seu ângulo de incidência sobre a superfície seca (PRADO, 1998). BROOKER *et al.* (1992) afirmam que, devido à maioria dos produtos biológicos possuírem formas irregulares, torna-se difícil obter valores exatos para: o coeficiente de transferência de calor por convecção (h_c); o coeficiente de transferência de massa (h_m) e para a área superficial do produto (A).

2.2.1.2 - Período com taxa de secagem decrescente

Durante esse período a resistência interna ao transporte de água se torna maior que a resistência externa e, a migração interna de água passa a ser o fenômeno que controla o processo. A maioria dos estudiosos afirma que na primeira fase do período de razão decrescente, o transporte de água pode ocorrer por escoamento capilar, difusão de líquido ou difusão de vapor, podendo, entretanto, ocorrer a simultaneidade desses mecanismos.

BROOKER *et al.* (1992) afirmam que a dificuldade em prever a taxa de secagem de produtos biológicos durante o período com taxa decrescente, dá-se em função dos mecanismos de transferência externa (transferência de calor e massa por convecção) e dos mecanismos de transferência no interior do produto (transferência de calor por condução e transferência de massa por difusão).

Dois métodos são utilizados para estudar a secagem de produtos biológicos durante o período com taxa decrescente: o empírico e o teórico. O método empírico analisa a secagem mediante os dados experimentais obtidos em laboratórios, tais como temperatura, velocidade e umidade relativa do ar de secagem. Os métodos teóricos consideram não só as condições experimentais, como também os mecanismos de transporte de líquido, energia e massa no interior dos produtos.

2.2.2 – Teoria de secagem

Os mecanismos físicos propostos para descrever a transferência de água em produtos capilares porosos são:

- a) movimento de líquido devido às forças superficiais (difusão capilar);
- b) movimento de líquido devido à diferenças na concentração de umidade (difusão de líquido);
- c) movimento de líquido devido à difusão da umidade nas superfícies dos poros (difusão na superfície);
- d) movimento de vapor devido à diferenças na concentração de vapor (difusão de vapor);
- e) movimento de vapor devido à diferenças de temperatura (difusão térmica);
- f) movimento de água e de vapor devido às diferenças de pressão total (fluxo hidrodinâmico).

Para explicar esses mecanismos foram desenvolvidas algumas teorias, conforme registra a literatura especializada.

2.2.2.1 - Teoria de difusão líquida

Segundo FORTES (1978), Lewis, Newman e Sherwood foram os primeiros pesquisadores a propor a teoria de difusão líquida para explicar a movimentação de líquido no interior de um sólido durante o processo de secagem. A teoria de difusão é

fundamentada na segunda lei de Fick que expressa a difusão de líquido por meio do gradiente de concentração no sólido, tal que:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \nabla (D \nabla U) \quad (2)$$

Comumente, o coeficiente de difusão é considerado constante ou linearmente dependente da temperatura e do teor de água do produto (FIOREZE, 2004). Quando depender da temperatura, o coeficiente de difusão varia de acordo com uma equação do tipo Arrhenius, como segue:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E}{R_v T_{abs}}\right) \quad (3)$$

ALVARENGA *et al.* (1980) simularam a distribuição de água no interior de grãos de feijão durante o processo de secagem e concluíram que a difusão líquida é predominante nos primeiros sessenta minutos quando os teores de água são elevados. A partir desse tempo, a difusão de vapor é quem domina o processo. Observação semelhante também foi constatada por FORTES e OKOS (1981), durante a secagem de milho a temperaturas entre 26,7 e 150 °C.

CRANK (1975) encontrou a solução da equação de Fick para as variadas condições iniciais e limites das diferentes formas geométricas. Para coordenadas cilíndricas a equação é expressa como:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{D}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r D \frac{\partial U}{\partial z} \right) \right] \quad (4)$$

em que r é a coordenada radial, θ é a coordenada polar e z a coordenada axial.

A equação correspondente para uma esfera em termos de coordenadas polares esféricas (r , θ e ϕ) é escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(D r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(D \sin \theta \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{D}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 U}{\partial \phi^2} \right] \quad (5)$$

Na secagem de materiais homogêneos, a teoria de difusão líquida para transferência unidimensional com coeficiente de difusão constante é expressa pela seguinte equação:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{c}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right) \quad (6)$$

em que

$c = 0$ para corpos planos, 1 para corpos cilíndricos e 2 para corpos esféricos.

2.2.2.2 – Teoria de vaporização-condensação

A teoria de vaporização-condensação considera que a água, num meio poroso, migra inteiramente na fase gasosa. Essa teoria concebe a difusão simultânea de calor e massa e, pressupõe que os poros tenham uma rede contínua de espaços incluídos no sólido. Segundo ALVARENGA *et al.* (1980), a teoria desenvolvida por Henry em 1939, considera, por conveniência matemática, que o total de vapor no sólido varia linearmente de acordo com a concentração de água e com a temperatura. O sistema de equações desenvolvido para representar a teoria citada é composto de uma equação do balanço de massa e outra do balanço de energia.

2.2.2.3 – Teoria capilar

A teoria capilar tem como base o conceito de potencial capilar, que é definido como sendo a diferença de pressão entre a água e o ar na interface água-ar num vaso capilar. A equação para o fluxo capilar líquido é expressa como:

$$J_l = - K_h \nabla \Psi \quad (7)$$

Para condições isotérmicas, o potencial capilar é proporcional ao gradiente de concentração de água, assim sendo, a Equação 7 passa a ser escrita da seguinte forma:

$$J_l = -K_h \rho_{ss} \nabla U \quad (8)$$

Krischer citado por FORTES (1978) afirmou que a primeira fase da secagem de alimentos é controlada pelo potencial capilar, e para isso, utilizou a Equação 7 com a seguinte modificação:

$$J_l = -K_l A \nabla U \quad (9)$$

2.2.2.4 – Teoria de Luikov

Com a finalidade de quantificar as transferências simultâneas de calor e massa, LUIKOV e MIKHAYLOV (1965) formularam uma teoria denominada “potencial de transferência”, fundamentada nos princípios de termodinâmica de processos irreversíveis. O “potencial de transferência” é obtido por meio da derivada parcial da função característica correspondente com respeito às coordenadas utilizadas na análise. Por exemplo, na transferência de calor, o potencial de transferência é a temperatura na coordenada de entropia. Na transferência de massa, o potencial de transferência seria a transferência de água no tempo. ALVARENGA *et al.* (1980) afirmam que o potencial de transferência de massa foi criado por analogia com a força motriz de transferência de calor, o gradiente de temperatura.

Sob o ponto de vista termodinâmico dos processos irreversíveis, a teoria de Luikov afirma que a água move-se em meios capilar-porosos, em condições isotérmicas, sob a ação de um gradiente de potencial de transferência de massa. Quanto aos mecanismos de transporte, a teoria considera que além da difusão, ocorram a efluxão e convecção de vapor, a difusão e a convecção de água no interior do meio poroso.

LUIKOV (1966) desenvolveu um modelo matemático para descrever a secagem de produtos capilares porosos, considerando que não há encolhimento do produto e que o fluxo de líquido ocorre devido à diferença de pressão total.

2.2.2.5 – Teoria de Fortes e Okos

O modelo proposto por FORTES e OKOS (1981b) é fundamentado na termodinâmica de processos irreversíveis, com base no princípio de equilíbrio local e na validade:

- a) da equação de Gibb para condições de não equilíbrio;
- b) das leis fenomenológicas lineares;
- c) das relações fundamentais de Onsager;
- d) de um sistema ser tomado como um contínuo;
- e) da migração de água na fase de líquido e vapor;
- f) da razão de transferência de calor e massa ser mais lenta que a razão de mudança de fase;
- g) do princípio de Curie.

O modelo teórico de Fortes e Okos parte do princípio de que a força motriz para o movimento isotérmico, tanto do líquido quanto do vapor, é um gradiente do teor de água de equilíbrio e não do teor de água. Segundo ALVARENGA *et al.* (1980), essa é a diferença fundamental entre a teoria de Fortes e Okos e as demais teorias. As seguintes equações expressam o modelo:

- a) para o fluxo líquido;

$$J_l = -K_l \rho_l \nabla \mu \quad (10)$$

- b) para o fluxo de vapor;

$$J_{vp} = -K_{vp} \nabla \rho_{vp} \quad (11)$$

- c) para o fluxo de calor na ausência de transporte de massa;

$$\left(J_q \right)_m = -K_{ap} \nabla T_{abs} \quad (12)$$

Desconsiderando o efeito gravitacional no transporte de vapor e aplicando as relações de Onsager, os autores encontraram as seguintes equações de fluxos:

d) para o fluxo de calor;

$$J_q = -C \nabla T - \left[\rho_l K_l R_v \ln(UR) + K_{vp} \left(\rho_{vo} \frac{\partial UR}{\partial T} + UR \frac{d\rho_{vo}}{dT} \right) \right] \frac{R_v T^2}{UR} \frac{\partial UR}{\partial U} \nabla U + T \left[\rho_l K_l R_v \ln(UR) + K_{vp} \left(\rho_{vo} \frac{\partial UR}{\partial T} + UR \frac{d\rho_{vo}}{dT} \right) \right] \vec{g} \quad (13)$$

e) Para o fluxo de líquido;

$$J_l = -\rho_l K_l R_v \ln(UR) \nabla T - \rho_l K_l \frac{R_v T}{UR} \left(\frac{\partial UR}{\partial U} \right) \nabla U + \rho_l K_l \vec{g} \quad (14)$$

f) Para o fluxo de vapor;

$$J_v = -K_{vp} \left(\rho_{vo} \frac{\partial UR}{\partial T} + UR \frac{d\rho_{vo}}{dT} \right) \nabla T - K_{vp} \rho_{vp} \left(\frac{\partial UR}{\partial U} \right) \nabla U \quad (15)$$

g) A equação para conservação de massa é expressa por;

$$\frac{\partial(\rho_s U)}{\partial t} = -\nabla \cdot (J_l + J_{vp}) \quad (16)$$

h) A equação de conservação de energia é descrita como;

$$\rho_s c_{pp} \frac{\partial T}{\partial t} - \rho_{ps} h_w \frac{\partial U}{\partial t} = \nabla \cdot \vec{J}_q - h_{fg} \nabla \cdot \vec{J}_{vp} - \vec{J}_l c_{pl} \cdot \nabla T - \vec{J}_{vp} c_{pvp} \cdot \nabla T \quad (17)$$

2.2.2.6 – Teoria de Philip e De Vries

De acordo com FORTES (1978) essa teoria é composta de um sistema de equações que descrevem umidade e transferência de calor em materiais porosos, combinando umidade e gradientes térmicos. Os autores dessa teoria formularam um sistema de equações de transferência de calor e massa, separadamente, e estudaram a simultaneidade desses fenômenos ajustando os coeficientes de transferências. O fluxo de vapor é expresso pela seguinte equação:

$$J_{vp} = -D_{is} \nabla U - D_{te} \nabla T \quad (18)$$

Para o fluxo líquido a expressão é descrita por:

$$J_l = -D_{is} \nabla U - D_{te} \nabla T - \phi \quad (19)$$

A teoria assume que o transporte de água em meios porosos ocorre basicamente por difusão de vapor e capilaridade, sendo que as aproximações utilizadas para referendar a teoria têm um princípio mecanicista* (FORTES e OKOS, 1980).

2.2.2.7 - Teorias de Krischer's, Berger e Pei

No modelo de Krischer assume-se que durante a secagem, a água pode migrar no estado líquido por capilaridade e, no estado de vapor devido a um gradiente de concentração de vapor. Assim sendo, as equações para os fluxos de líquido e de vapor, respectivamente, são escritas da seguinte forma:

$$J_l = -D_l \rho_l \nabla U \quad (20)$$

$$J_{vp} = -D_{vp} \nabla P_v \quad (21)$$

*Doutrina filosófica, também adotada como princípio heurístico na pesquisa científica, que concebe a natureza como uma máquina, obedecendo a relações de causalidade necessárias, automáticas e previsíveis, constituídas pelo movimento e interação de corpos materiais no espaço. A física do século XX, especialmente a teoria quântica, tornou o mecanicismo ultrapassado no âmbito científico.

Com base em algumas suposições, Berger e Pei substituíram a equação de fluxo de vapor por uma outra, expressa da seguinte forma:

$$J_{vp} = - D_{vp} (\omega - \vartheta) \nabla \rho_{vp} \quad (22)$$

em que

ω = fração volumétrica de ar dentro dos poros (volume de ar por volume de sólido);

ϑ = conteúdo volumétrico de água (volume de água por volume de sólido seco).

Segundo FORTES (1978), há uma similaridade entre as teorias de Luikov, de Philip e De Vries e de Berger e Pei. O modelo de Berger e Pei não tem boa aplicabilidade em materiais biológicos, no entanto, o modelo de Krischer's pode ser aplicado em diversos materiais.

2.2.3 – Equações de secagem em camadas finas

De acordo com a literatura, as equações de secagem em camadas finas estão divididas em três grupos: as equações teóricas, as semiteóricas e as empíricas. As equações teóricas descrevem o fenômeno levando em consideração as condições externas (temperatura e fluxo do ar de secagem, teor de água inicial, umidade relativa do ar) e os mecanismos de transporte de líquido no interior do produto. Essas equações têm como princípio os mecanismos da difusão de massa, difusão térmica, fluxos capilares e fluxos hidrodinâmico (BAKKER-ARKEMA *et al.*, 1974). Comumente, no estudo da secagem de produtos de origem biológica a teoria de difusão de líquido é mais utilizada. Essa teoria estabelece as seguintes suposições:

- a) a redução de volume é desprezível;
- b) não há efeito de capilaridade;
- c) o produto entra em equilíbrio térmico com o ar de secagem imediatamente;
- d) os efeitos de transferência de energia e massa entre os grãos são desprezíveis.

As equações semiteóricas baseiam-se, geralmente, na lei de resfriamento de Newton aplicada à transferência de massa. Durante o processo de secagem considera-se

que as condições sejam isotérmicas e que a transferência de água se limite à superfície do produto. Lewis, citado por BROOKER *et al.* (1992), propôs que, no período com taxa de secagem decrescente de produtos higroscópicos porosos, a perda de água seja proporcional à diferença entre o teor de água do produto e seu teor de água de equilíbrio, ou seja:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = K (U - U_{eq}) \quad (23)$$

sendo k a constante de secagem. A integração dessa equação no tempo, para teores de água decrescente (U), a partir do teor de água inicial (U_i), resulta em:

$$\frac{U - U_{eq}}{U_i - U_{eq}} = \exp(-K t) \quad (24)$$

PAGE (1949) modificou a Equação 24 acrescentando-lhe mais um parâmetro. Assim sendo, tem-se:

$$\frac{U - U_{eq}}{U_i - U_{eq}} = \exp(-K t^N) \quad (25)$$

As equações empíricas não levam em consideração os fundamentos termodinâmicos dos processos de secagem. Elas fornecem uma relação direta entre o tempo de secagem e o conteúdo de água do produto. Entretanto, são equações com maior sucesso nas simulações práticas de secagem de grãos, sendo que sua validade está restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos (ROSSI e ROA, 1980; PARTI, 1993). PARTI (1990) cita como exemplo de expressões empíricas: equação de Thompson *et al.*; equação de Wang-Sing e a equação de Sharma *et al.* JAYAS *et al.* (1991) relacionaram alguns modelos de equações de secagem em camadas finas, com parâmetros definidos para uma série de produtos agrícolas.

2.2.3.1 - Aplicações de modelos de equações de secagem em camadas finas

HUTCHINSON e OTTEN (1983) usaram o modelo de secagem em camada fina de Page para estudar a secagem de feijão-branco com um teor de água de 34 %, base seca, e soja com teor de água de 50 %, base seca. Foram utilizadas temperaturas de 32, 38 e 49 °C, e velocidades do ar de secagem de 0,25, 0,36 e 0,58 m/s. O modelo de Page proporcionou valores satisfatórios para os parâmetros (K e N) expressos em função da temperatura e da umidade relativa.

RADAJEWSKI *et al.* (1992) utilizaram o modelo de Page para traçar as curvas de secagem de feijão (*Phaseolus vulgaris*) contendo de 14 até 25 % de água e, o modelo difusional esférico para simular o processo. Para temperatura de 46 °C e umidade relativa de 42 %, houve uma boa correlação entre o modelo de Page e o modelo difusional.

TAGAWA *et al.* (1996) estudaram a influência da temperatura (25, 30, 35, 40, e 45 °C) e da umidade relativa do ar (15, 20, 25, 30 e 35 %) durante a secagem de feijão (*Phaseolus vulgaris*) com teor de água inicial de 33 %, base seca. Os autores usaram o modelo difusional baseado na equação de Arrhenius para determinar a constante de secagem. Ficou evidenciado que a constante de secagem depende tanto da temperatura quanto da umidade relativa do ar de secagem.

AFONSO JÚNIOR e CORRÊA (2000) fizeram a secagem em camada fina de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris*) com teor de água inicial de 20, 37 e 59 %, base seca, a temperaturas de 35, 40, 45 e 50 °C, e vazão de $10 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Os dados experimentais foram utilizados para ajustar os seguintes modelos: Page, Thompson, difusional e exponencial. Os autores concluíram que o modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais.

BASUNIA e ABE (2001) efetuaram a secagem de arroz em casca em um secador solar com convecção natural, com temperaturas de 22 a 34,9 °C, umidades relativa entre 34,5 e 57,9 % e teor inicial de água de 37 a 37,7 %, base seca. O modelo de Page descreveu com precisão a secagem em camadas finas.

2.2.4 - Secagem em leito fixo

Na secagem em leito fixo, não há movimentação da massa de grãos no interior do secador, o produto é colocado em um compartimento de fundo perfurado, por onde o fluxo de ar de secagem é forçado a passar pela massa de grãos no sentido ascendente. Durante a passagem do ar quente ocorre a troca de umidade entre os grãos e o ar. Esse fenômeno ocorre em uma região denominada de zona de secagem que, no decorrer do processo, avança das camadas inferiores para a superfície da massa de grãos, criando, assim, um gradiente de umidade e de temperatura no interior da massa.

A secagem em leito fixo geralmente é feita com temperaturas entre 40 e 70 °C. O fluxo de ar depende da taxa de secagem com que se quer trabalhar, do teor inicial de água do produto, da altura da massa de grãos e da potência do ventilador. Essa forma de secagem também é conhecida como secagem em camada estacionária, leito fixo e secagem em lote.

2.2.5 – Secagem em camada espessa

Os grãos são espalhados, uniformemente, sobre um piso perfurado até a uma altura que varia de 0,4 a 0,6 m. Altura superior poderá causar problemas, tais como: alto gradiente de umidade e temperatura; exigência de ventilador com maior potência; aumento do tempo de secagem, que acarreta aumento no custo da operação.

2.2.6 – Parâmetros de secagem

2.2.6.1 – Equilíbrio higroscópico

Teor de água de equilíbrio é o teor de água que o produto atinge quando este produto é deixado por um tempo suficientemente longo em determinada condição fixa de temperatura e umidade relativa do ar que o envolve. Nesta condição, a pressão de vapor da água na superfície do produto é igual à pressão de vapor da água contida no ar (ROSSI e ROA, 1980). O teor de água do produto, quando em equilíbrio com o ambiente, é denominado teor de água de equilíbrio ou equilíbrio higroscópico.

Para uma determinada temperatura, a relação entre a quantidade de água contida no produto e a correspondente umidade relativa de equilíbrio ou atividade de água (a_w), pode ser expressa por meio das curvas de “isotermas de equilíbrio”. A umidade relativa

a que um produto é submetido a uma dada temperatura, corresponde a atividade de água naquela temperatura (DUARTE *et al.*, 2006).

A atividade de água pode ser expressa pela seguinte equação:

$$a_w = \frac{P_{vp}}{P_{va}} \quad (26)$$

em que

P_{vp} = pressão parcial de vapor da água do produto;

P_{va} = pressão de vapor da água pura a mesma temperatura.

2.2.6.2 - Equações de equilíbrio higroscópico

2.2.6.2.1 - Modelo de Kelvin

Kelvin, citado por BROOKER *et al.* (1992), criou um modelo para o conteúdo de água de adsorção em sólidos, baseado na teoria de condensação capilar, cuja equação é expressa por:

$$\ln\left(\frac{P_v}{P_{vs}}\right) = -\frac{2\sigma V \cos\gamma}{\tau R_0 T_{abs}} \quad (27)$$

2.2.6.2.2 - Modelo de Langmuir

De acordo com PRADO (1998), no modelo de Langmuir considera-se que, no equilíbrio, a taxa à qual as moléculas se condensam na superfície é igual à taxa em que elas evaporam da superfície. Além disso, o modelo considera que a probabilidade de evaporação das moléculas é a mesma se as posições vizinhas na superfície estivessem ocupadas ou não, e que todas as moléculas provenientes da fase gasosa colidem com a molécula já adsorvida na superfície e é elasticamente refletida. A equação de Langmuir é descrita como:

$$\frac{U_i}{U_{mc}} = \frac{C_1 a_w}{1 + C_1 a_w} \quad (28)$$

2.2.6.2.3 - Modelo de BET

Com base no conceito de adsorção na monocamada molecular, os pesquisadores Brunauer, Emmett e Teller propuseram um modelo em que a água se adsorve na forma de camadas. Conforme CHIRIFE *et al.* (1992) a equação de BET é definida como:

$$\frac{a_w}{(1-a_w)C_1} = \frac{1}{C_1 C_{BET}} + \frac{a_w(C_{BET}-1)}{C_1 C_{BET}} \quad (29)$$

O modelo de BET possui dois parâmetros de ajuste, C_{BET} e C_1 , que são calculados traçando-se o gráfico de $\{a_w / [(1-a_w)C_1]\}$ em função de a_w .

2.2.6.2.4 - Modelo de GAB

De acordo com CHIRIFE *et al.* (1992) a equação de GAB (desenvolvida por Guggenheim, Anderson e de Bôer) é uma extensão das teorias de Langmuir e de BET. Possui os dois parâmetros de ajuste da Equação 29 e introduz um terceiro parâmetro (k), escrita como:

$$U = \frac{C_1 k U a_w}{(1-k a_w)(1-k a_w + C_1 k a_w)} \quad (30)$$

CHIRIFE *et al.* (1992) determinaram o valor da constante k no modelo de GAB, para uma série de produtos alimentícios e proteínas. Valores de k variaram de 0,82 a 0,88 no caso das proteínas e, 0,7 a 0,77 para os produtos alimentícios.

Com base em dados experimentais de quatorze produtos agrícolas e de um grupo considerável de proteínas, TIMMERMANN *et al.* (2001) estudaram a diferença existente no valor da monocamada e da constante de energia (k) nos modelos de GAB e BET. Os autores concluíram que o modelo de GAB fornece parâmetros mais representativos que o modelo de BET.

2.2.6.2.5 - Modelo de Henderson

A equação proposta por Henderson é um modelo semi-empírico com base na equação de adsorção de Gibbs, expressa como:

$$1-UR = \exp\left[-b_1 T_{abs} \left(U_{eq}^{b_2}\right)\right] \quad (31)$$

Segundo BROOKER *et al.* (1992) a equação de Henderson não é muito apropriada para grãos. A equação de Henderson modificada, que passou a ser chamada de equação de Henderson-Thompson é definida como:

$$U_{eq} = \left(\frac{\ln(1-UR)}{(-b_1(T+b_2))} \right)^{\left(\frac{1}{b_3}\right)} \quad (32)$$

2.2.6.2.6 – Modelo de Chung e Pfof modificado

Conforme FRANCESCHINI *et al.* (1996), CHUNG e PFOST (1967) desenvolveram uma equação empírica descrita da seguinte forma:

$$U_{eq} = b_1 - b_2 \ln[-(T+b_3)\ln(UR)] \quad (33)$$

2.2.6.2.7 – Modelo de Cavalcanti Mata

CAVALCANTI MATA *et al.* (1985) propuseram a seguinte equação para prever a umidade de equilíbrio do feijão “mulatinho” (*Phaseolus vulgaris* L.):

$$U_{eq} = \frac{\ln(1-UR) - b_2}{b_1 T^{b_2}} \quad (34)$$

2.2.6.2.8 - Modelo de Oswin modificado (MENKOV, 2000)

$$U_{eq} = (b_1 + b_2 T) \left(\frac{UR}{(1-UR)} \right)^{\left(\frac{-1}{b_3}\right)} \quad (35)$$

2.2.6.2.9 - Modelo de Halsey modificado (IGLESIAS e CHIRIFE, 1976a)

$$U_{eq} = \exp(b_1 + (b_2 T)) (-\ln(UR))^{-1/b_3} \quad (36)$$

2.2.6.2.10 - Modelo de Henderson-Thompson modificado por Cavalcanti Mata (CAVALCANTI MATA, 1997)

$$U_{eq} = \left(\frac{\ln(1-UR)}{(-b_1 (T^{b_2}))} \right)^{\left(\frac{1}{b_3} \right)} \quad (37)$$

2.2.6.2.11 - Modelo de Sigma-Copace modificado (FRANCESCHINI *et al.*, 1996)

$$U_{eq} = \exp[b_1 - (b_2 T) + (b_3 \exp(UR))] \quad (38)$$

PAPAS e RAO (1987) estudaram a influência da temperatura (25, 35, 45, 50 e 70 °C) e da umidade relativa (33 a 86 %) sobre as isotermas de feijão-macáçar (*Vigna unguiculata*). Os dados foram utilizados para ajustar seis modelos: BET, Chung e Pfof, Halsey, Henderson, Oswin e Smith. Os modelos de Henderson e de Chung e Pfof foram os melhores para temperaturas de 25, 35 e 45 °C. Para temperatura de 50 °C, os modelos de Smith e de Henderson se ajustaram melhor. Os modelos de Halsey e Oswin foram mais eficientes para a temperatura de 70 °C.

SINÍCIO *et al.* (1995) utilizaram o modelo de Halsey modificado e o de Chung-Pfof modificado para determinar o teor de água de equilíbrio do trigo. A umidade relativa variou de 27 a 92 % e a temperatura de 7,4 a 35,2 °C. O modelo de Chung-Pfof modificado forneceu melhores resultados tanto para o processo de dessecção como para adsorção.

CHRIST (1996) ajustou as isotermas de equilíbrio higroscópico de sementes de canola (*Brassica napus L.* variedade oleífera), para temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C e umidade relativa de 30, 40, 50 e 60 %, por meio do modelo de Henderson-Thompson.

FRANCESCHINI *et al.* (1996) utilizaram os modelos de Henderson, Henderson-Thompson, Chung-Pfof e Sigma-Copace para determinar as curvas de equilíbrio higroscópico (processo de dessecção) do milho, para temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C

e umidade relativa de 20, 40, 55 e 70 %. Os autores concluíram que os modelos de Henderson-Thompson e Chung-Pfost foram os que melhores se ajustaram aos dados experimentais do milho híbrido BR-201.

BASUNIA e ABE (1999) utilizaram os modelos de Henderson-Thompson, Chung-Pfost, Oswin e Halsey modificados para determinar o teor de água de equilíbrio do arroz. A umidade relativa do ar variou de 56 a 89 % e a temperatura de 17,8 a 45 °C. Os autores encontraram valores mais consistentes por meio do modelo de Chung-Pfost.

MENKOV (2000) testou os modelos de Halsey, Oswin e Henderson modificados, para analisar os dados experimentais de sementes de lentilhas, com temperaturas de 5, 20, 40 e 60 °C, e umidade relativa entre 11 e 87 %. O modelo de Oswin modificado forneceu melhores resultados.

AJIBOLA *et al.* (2003) utilizaram os modelos de Henderson, Chung-Pfost, Halsey e Henderson-Thompson modificado para encontrar as curvas de equilíbrio higroscópico do feijão-macáçar (*Vigna unguiculata*) contendo entre 4,5 e 22,2 % de água, base seca, para cinco temperaturas (40, 50, 60, 70 e 80 °C). Segundo os autores, o modelo de Henderson-Thompson apresentou um ajuste satisfatório na predição das isotermas de equilíbrio higroscópico do produto estudado.

2.2.6.3 - Calor latente de vaporização

Clausius e Clapeyron, com base nas teorias termodinâmicas, desenvolveram uma equação diferencial para pressão de vapor de um sistema líquido e vapor em equilíbrio (ROSSI e ROA, 1980; KEEY, 1991).

$$\frac{dP_v}{dT} = \frac{h_{fg}}{R_o} \frac{P_v}{T^2} \quad (39)$$

OTHMER (1940) integrou a Equação 39 considerando o calor latente de vaporização da água constante dentro de certo intervalo de temperatura. Portanto, tem-se:

$$\ln P_v = -\frac{h_{fg}}{R_o} \frac{1}{T_{abs}} + k \quad (40)$$

Traçando-se o gráfico dos valores de $\ln(P_v)$ em função de $(1/T)$, para uma determinada umidade de equilíbrio do produto, encontra-se o coeficiente angular igual a $(-h_{fg}/R_o)$.

Tomando por base a Equação 40, Othmer derivou outra equação para o cálculo do calor latente de vaporização, descrita como:

$$\ln(P_v) = \frac{h_{fg}^*}{h_{fg}} \ln(P_{vs}) + k \quad (41)$$

Nesse caso, traça-se o gráfico dos valores de $\ln(P_v)$ em função de $\ln(P_{vs})$ para obter o coeficiente angular igual a (h_{fg}^*/h_{fg}) , para certa umidade de equilíbrio e a diversas temperaturas.

FRANCESCHINI *et al.* (1996) estudaram as propriedades físicas do milho e determinaram o calor latente de vaporização da água por meio da seguinte equação:

$$\frac{h_{fg}^*}{h_{fg}} - 1 = 0,556192 \exp(-10,134142 U_{eq}) \quad (42)$$

AJIBOLA *et al.* (2003) determinaram as propriedades físicas do feijão-macáçar (*Vigna unguiculata*) e calcularam o calor latente de vaporização da água utilizando a seguinte equação:

$$\frac{h_{fg}^*}{h_{fg}} = 1 + 0,207 \exp(-8,645 U) \quad (43)$$

2.2.6.4 - Calor específico

A quantidade de energia térmica (Q) necessária para elevar a temperatura de uma substância é proporcional à variação de temperatura e à massa da substância:

$$Q = C \Delta T = m c \Delta T \quad (44)$$

em que C é a capacidade calorífica da substância, que se define como a energia térmica necessária para elevar em um grau a temperatura de uma substância. O calor específico é a capacidade calorífica por unidade de massa, ou seja:

$$c_p = \frac{C}{m} \quad (45)$$

A partir dos dados experimentais de cacau, café, milho e soja, ROSSI e ROA (1980) determinaram o calor específico para esses mesmos produtos utilizando a seguinte equação:

$$c_p = \frac{C}{\rho_{ap} \alpha} \quad (46)$$

SOUZA (2004) calculou o calor específico do feijão-macáçar (*Vigna unguiculata*) por meio da seguinte equação:

$$c_p = 1493,669 + (7,531 U_{bs}) \quad (47)$$

2.3 – Caracterização física dos grãos

2.3.1 – Massa específica aparente

A massa específica aparente é definida como sendo a razão entre uma determinada massa de grãos e seu respectivo volume, definida como:

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V} \quad (48)$$

2.3.2 – Porosidade

A porosidade de uma massa de grãos é a razão entre o volume dos espaços intergranulares e o volume global. Conhecendo-se a massa específica real e a aparente, a porosidade pode ser expressa pela seguinte relação:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\rho}{\rho_{ap}} \right) \quad (49)$$

A porosidade de uma massa de grãos também pode ser determinada experimentalmente com a utilização de um picnômetro de comparação a ar. Nesse caso, a porosidade é expressa pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \quad (50)$$

em que P_1 e P_2 é a pressão no cilindro um e dois, respectivamente.

2.3.3 – Volume do grão

A forma geométrica da maioria dos grãos é muito próxima da forma de um esferóide. Por isso, comumente, quando se pretende encontrar o volume e a área superficial desses produtos faz-se essa aproximação. MOHSENIM (1970) apresenta as seguintes equações para o cálculo do volume e da área superficial de um esferóide, respectivamente:

a) esferóide prolato;

$$V = \frac{4}{3} (ab^2) \quad (51)$$

$$S = 2\pi b^2 + 2\pi \frac{(ab)}{\phi} \text{sen}^{-1} \phi \quad (52)$$

b) esferóide oblato;

$$V = \frac{4}{3} (a^2 b) \quad (53)$$

$$S = 2\pi a^2 + \pi \frac{(b^2)}{\phi} \ln \left(\frac{1+\phi}{1-\phi} \right) \quad (54)$$

As constantes a e b são os semi-eixos da elipse, e ϕ é a excentricidade, que é definida como:

$$\phi = \left[1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (55)$$

O volume de um grão ou de uma massa de grãos também pode ser determinado pelo método do deslocamento de líquido. Uma outra forma é fazendo-se a medição direta de seus três eixos ortogonais (comprimento, largura e espessura) com o auxílio de um instrumento de medição.

2.3.4 – Área específica

A área específica é a razão entre a área superficial e seu respectivo volume, expressa como:

$$A_e = \frac{S}{V} \quad (56)$$

2.4 – Simulação de secagem em camada espessa

Quando se estuda o perfil de secagem de um determinado produto, utilizam-se modelos matemáticos que têm como objetivo correlacionar os dados obtidos de forma experimental com os dados obtidos por simulação matemática. A simulação de processos, na maioria das vezes, torna-se difícil em virtude da falta de dados confiáveis e do conhecimento dos mecanismos de transferência de calor e massa no interior do produto. Encontram-se na literatura diversos modelos de simulação de secagem, dentre eles, destacam-se: Modelo de Thompson; Modelo de Hukill; Modelo de Morey; e o Modelo da Universidade Estadual de Michigan.

2.4.1 – Modelo de Hukill

Conforme QUEIROZ *et al.* (1987), o modelo de Hukill prevê que, decorrido certo tempo depois do início do processo de secagem, o teor de água em uma certa posição da camada é obtido pela seguinte equação:

$$RU = \frac{2^x}{(2^x + 2^y - 1)} \quad (57)$$

em que

$$RU = \frac{(U - U_{eq})}{(U_i - U_{eq})} \quad (58)$$

O fator de profundidade é expresso pela equação:

$$X = \frac{n \rho h_{fg}^* (U - U_{eq})}{c_a \vartheta Q(T - T_{eq})} \quad (59)$$

em que,

$$Y = \frac{t}{\vartheta} \quad (60)$$

O tempo de meia-resposta (ϑ) é definido como o período de tempo necessário para que a razão de umidade seja reduzida de 1 para 0,5, sob determinadas condições do ar de secagem. QUEIROZ *et al.* (1982) determinaram o tempo de meia-resposta para o milho por meio da seguinte equação:

$$\vartheta = \exp(2,413 - 0,016U_i + 0,003T - 0,001U_i T) \quad (61)$$

DENISIENIA e GINER (1996), SACILIK (2004), AGULLO e MARENIA (2005) e BIAGGIONI *et al.* (2005) utilizaram o modelo de Hukill para simulação de secagem de produtos agrícolas.

2.4.2 – Modelo de Thompson

O Modelo de THOMPSON *et al.* (1968) é considerado um modelo semi-empírico que simula o processo de secagem por meio de equações fundamentadas nas leis de transferência de energia e massa, e utiliza uma equação empírica para secagem em camada fina.

Esse modelo concebe a camada espessa como constituída de várias camadas finas sobrepostas umas sobre as outras. A cada intervalo de tempo, as variações ocorridas no ar de secagem e nos grãos são calculadas para cada camada. Considerando as trocas de energia e umidade que incidem sobre o ar aquecido e a massa de grãos, equaciona-se a secagem para cada camada fina, conforme esquema mostrado na Figura 1.

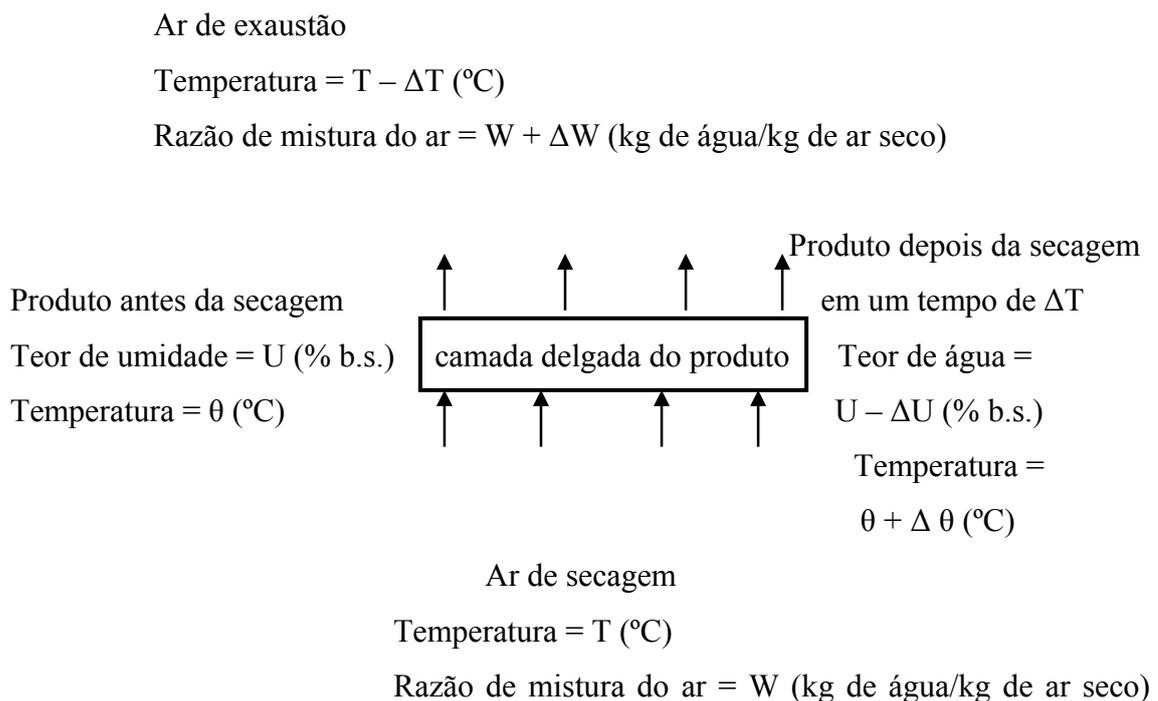


Figura 1 – Diagrama esquemático do modelo de Thompson.

Para o desenvolvimento do modelo foram feitas as seguintes suposições:

a) secagem em camada delgada - a secagem de uma camada delgada é representada pela seguinte equação:

$$t = A \ln(RU) + B [\ln(RU)]^2 \quad (62)$$

sendo

$$A = a_1 + a_2 \theta$$

$$B = b_1 \exp(b_2 \theta)$$

em que a_1 , a_2 , b_1 e b_2 são constantes que dependem do produto, A e B constantes que dependem da temperatura do produto.

b) a temperatura do grão é igual à temperatura do ar que o envolve;

c) teor de umidade de equilíbrio - o teor de umidade de equilíbrio do produto, para determinada condição do ar de secagem, é dado por:

$$U_{eq} = \frac{\ln(1 - UR)}{N_1 (T_{eq} + N_2)}^{1/N_3} \quad (63)$$

sendo N_1 , N_2 e N_3 constantes que dependem do produto.

d) o calor latente de vaporização da água no produto é representado pela equação:

$$h_{fg} = (606 - 0,57T) (1 + a_1 \exp(a_2 U)) \quad (64)$$

em que a_1 e a_2 são constantes que dependem do produto.

e) o calor específico do produto é expresso por:

$$c_p = (c_1 + c_2 U_{bs}) R_c \quad (65)$$

em que

c_1 e c_2 = são constantes que dependem do produto;

R_c = razão de conversão de unidades, kg de produto/kg de ar seco.

$$R_c = \rho_p \frac{n}{n^*} \frac{V_{esp}}{Q \Delta t 60} \quad (66)$$

f) temperatura de equilíbrio do ar de secagem e do grão:

$$T_{eq} = \frac{(0,24 + 0,45 W) T + c_p \theta}{(0,24 + 0,45 W + c_p)} \quad (67)$$

g) quantidade de água removida:

A quantidade de água perdida pelo produto no intervalo de tempo Δt é calculada pela equação de camada delgada:

$$t_{eq} = F_1 \ln(RU) + F_2 \ln(RU)^2 + \Delta t \quad (68)$$

Aplica-se este tempo equivalente (t_{eq}) na raiz da Equação 69, para obter o teor de umidade final, depois de o ar ter passado pela camada delgada:

$$U_f = \exp\left(\frac{-F_1 - \sqrt{F_1^2 + 4t_{eq} F_2}}{2F_2}\right) (U_i - U_{eq}) + U_{eq} \quad (69)$$

As condições finais do ar, depois do intervalo de tempo Δt , é calculada pela equação:

$$\Delta W = \frac{(U_i - U_f) R_e}{100} \quad (70)$$

$$W_f = W - \Delta W \quad (71)$$

em que, W_f é razão de umidade final do ar, depois de ter passado por uma camada de secagem, e ΔW é a variação entre a razão de umidade inicial e final, em $\text{kg de } \text{água} \cdot \text{kg}^{-1}$ de ar seco.

h) a temperatura final do ar e do produto é dada por:

$$T_f = \frac{(0,24 + 0,45W_0)T_{eq} - \Delta W(587,9 + \Delta h_{fg} - c_w \theta) + c_p \theta}{(0,24 + 0,45 W_f + c_p)} \quad (72)$$

i) ponto de estado exequível do ar de secagem:

Depois de cada balanço de calor, é necessário determinar se a temperatura e a umidade absoluta do ar são exequíveis, isto é, se a umidade relativa do ar determinada matematicamente é inferior a 100 %. Se o ponto de estado for inexequível, é necessário efetuar outro balanço de calor e simular a condensação da água do ar no grão. Assim sendo, um balanço de calor entre as condições iniciais e finais, para o incremento de tempo, Δt , é escrito da seguinte forma:

$$\begin{aligned} & [0,24T_0 + W_0(1060,8 + 0,45T_0) + c_p \theta_0 + (W_f - W_0)(c_w \theta_0)] \\ & = [0,24 T_f + W_f(1060,8 + 0,45T_f) + c_p T_f] \end{aligned} \quad (73)$$

Este balanço tem duas incógnitas: T_f , a temperatura final, e W_f , a umidade absoluta do ar de exaustão. Fazendo a interpolação da umidade relativa em função da relação de temperatura, esta converge para uma umidade relativa de 100% e determina-se T_f e W_f . Depois de três ou quatro tentativas, obtém-se uma umidade relativa entre 99 e 100%. A água que é removida do ar é condensada no produto e a umidade final (U_f) é determinada por:

$$U_f = U_i - \left[\frac{100(W_f - W_0)}{R_c} \right] \quad (74)$$

BERBERT *et al.* (1995), CAVALCANTI MATA (1997), SOUZA *et al.* (2002) e LEITE *et al.* (2005) utilizaram o modelo de Thompson para secagem de produtos biológicos.

2.4.3 – Modelo de Michigan

No Modelo da Universidade Estadual de Michigan (M.S.U.), proposto por BAKKER-ARKEMA *et al.* (1974), as equações são obtidas por meio dos balanços de energia e massa em um volume diferencial ($A dy$) localizado numa posição arbitrária da massa de grãos.

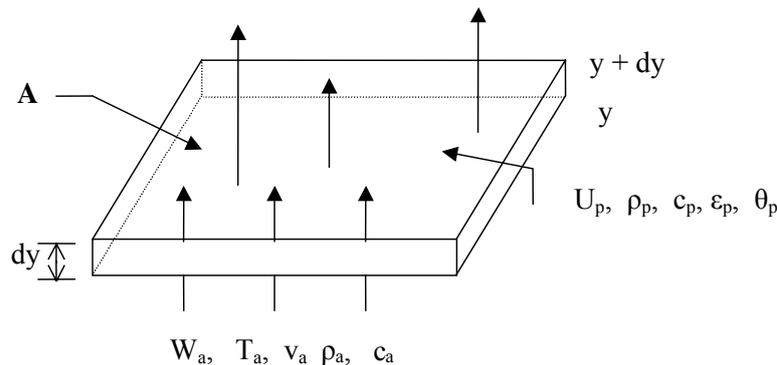


Figura 2 – Volume elementar da camada de grão.

No desenvolvimento do modelo foram feitas as seguintes suposições:

- a) o encolhimento dos grãos durante a secagem não é considerado;
- b) o ar é distribuído uniformemente através da camada de grãos;
- c) a transferência de calor por condução entre os grãos é desprezível;
- d) as paredes do silo são adiabáticas, com capacidades caloríficas desprezíveis;
- e) as capacidades caloríficas do ar e do produto são constantes durante pequenos períodos de tempo;
- f) o gradiente de temperatura dentro dos grãos, individualmente, é desprezível;
- g) há uma equação capaz de estimar com precisão satisfatória a perda de água em uma camada delgada de produto, e uma equação para as isothermas de umidade de equilíbrio;
- h) a variação da temperatura ($\partial T/\partial t$) e da razão de mistura do ar ($\partial W/\partial t$) com respeito ao tempo é desprezível, quando comparada com a variação da temperatura e da razão de mistura com respeito à posição ($\partial T/\partial y$ e $\partial W/\partial y$), respectivamente.

Para simular a secagem em leito fixo por meio do modelo de Michigan é necessário fazer os balanços de energia e massa conforme descrito a seguir.

2.4.3.1 - Balanço de energia para o ar

A energia que entra na área A na direção de y , menos a energia que sai na direção $y + dy$, é igual à energia transferida por convecção para o produto mais a variação da entalpia do ar contido nos espaços vazios, em relação ao tempo. Dessa forma, o balanço de energia é descrito pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} & (\rho_a v_a c_a + \rho_a v_a c_v W) A T dt - (\rho_a v_a c_a + \rho_a v_a c_v W) \left(T + \frac{\partial T}{\partial y} dy \right) A dt = \\ & h_c A_e (T - \theta) A dy dt + (\rho_a c_a + \rho_a c_v W) \varepsilon A dy \frac{\partial T}{\partial t} dt \end{aligned} \quad (75)$$

Depois das considerações inerentes ao modelo, o balanço de energia do ar é definido como:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = - \frac{h_c A_e (T - \theta)}{[(\rho_a v_a (c_a + c_v W))]} \quad (76)$$

2.4.3.2 - Balanço de energia para o produto

A energia transferida por convecção, do ar para o produto, é igual à energia utilizada para aquecer o produto, mais a energia utilizada para evaporar a água do produto, mais a energia utilizada para aquecer o vapor d'água evaporado. Assim sendo, o balanço de energia para o grão é descrito como:

$$\begin{aligned} h_c A_e (T - \theta) A dy dt = & \left(\rho_p c_p + \rho_p c_w U \right) A dy \frac{\partial \theta}{\partial t} dt - \\ & \left(h_{fg}^* \rho_a v_a \frac{\partial W}{\partial y} dy A dt \right) - \left(c_v (T - \theta) \rho_a v_a \frac{\partial W}{\partial y} dy A dt \right) \end{aligned} \quad (77)$$

Depois das simplificações a variação da temperatura do produto em um certo intervalo de tempo é descrita pela seguinte equação:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \left(\frac{h_c A_e}{\rho_p c_p + \rho_p c_w U} \right) (T - \theta) + \left(\frac{h_{fg}^* + c_v (T - \theta)}{\rho_p c_p + \rho_p c_w U} \right) \rho_a v_a \frac{\partial W}{\partial y} \quad (78)$$

2.4.3.3 - Balanço de massa para o ar

A quantidade de vapor d'água que entra na área A na direção de y, menos a quantidade de vapor que sai na direção y + dy, mais a variação da umidade do ar nos espaços vazios, é igual à perda de umidade do produto no interior do volume de controle. Logo, o balanço de massa para o ar passa a ser escrito da seguinte forma:

$$\rho_a v_a A W dt - \rho_a v_a A \left(W + \frac{\partial W}{\partial y} dy \right) dt + \varepsilon A \rho_a \frac{\partial W}{\partial t} dy dt = \rho_p A \frac{\partial U}{\partial t} dy dt \quad (79)$$

desprezando-se o termo $\frac{\partial W}{\partial t}$, obtém-se:

$$\frac{\partial W}{\partial y} = - \frac{\rho_p}{\rho_a v_a} \frac{\partial U}{\partial t} \quad (80)$$

2.4.3.4 - Balanço de massa para o produto

O teor de umidade do produto pode ser expresso por uma equação de secagem em camada fina capaz de estimar o fluxo de água no interior do produto, com precisão satisfatória.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \text{equação de secagem em camada fina adequada.} \quad (81)$$

Dessa forma, as Equações 76, 78, 80 e 81, respectivamente, constituem o sistema de equações diferenciais parciais do modelo ora descrito, para simulação de secagem em leito fixo, cujas condições de contorno são:

$$T(y = 0, t) = \text{Temperatura de entrada};$$

$$\theta(y, t = 0) = \theta \text{ inicial};$$

$$U(y, t = 0) = U \text{ inicial};$$

$$W(y = 0, t) = W \text{ de entrada}.$$

MARTINS (1982), WANG (1993), SUN *et al.* (1995), SRIVASTAVA e JOHN (2002), utilizaram o modelo de Michigan para modelar a secagem de grãos em leito fixo.

2.4.4 – Modelo de Morey

O modelo de Morey é uma extensão do modelo de Thompson para secagem em baixas temperaturas e baixos fluxos de ar. Segundo QUEIROZ *et al.* (1987), o modelo de Morey é considerado um dos melhores para a simulação de secagem a baixas temperaturas. Estudos comprovaram que os desvios entre os resultados experimentais e simulados são de pequena magnitude.

Conforme MOREY *et al.* (1979), experimentalmente, foi comprovado que a secagem das camadas inferiores não acontecia conforme simulava o modelo de Thompson, ou seja, o produto não entrava em equilíbrio com o ar de secagem tão rapidamente como se supunha. Assim sendo, esses autores adicionaram ao modelo uma equação empírica de secagem em camada fina que estima a perda de água do grão, para temperaturas entre 0 e 27 °C. Especificamente, para o milho, a equação é escrita da seguinte forma:

$$RU = \exp \left[-b_1 \left(t^{0,664} \right) \right] \quad (82)$$

em que

$$b_1 = \exp \left(-b_2 t^{b_3} \right) \quad (83)$$

sendo

$$b_2 = [6,0142 + 1,453 \times 10^{-4} (UR)^2]^{0,5} - (1,8 \theta + 32) [3,353 \times 10^{-4} + 3,0 \times 10^{-8} (UR)^2]^{0,5} \quad (84)$$

$$b_3 = [0,12264 - (1,461 \times 10^{-3} UR) + (4,14 \times 10^{-5} UR \theta) - (1,044 \times 10^{-4} \theta)] \quad (85)$$

Os resultados experimentais também indicaram a possibilidade de um efeito de histerese entre as isotermas de adsorção e dessorção. Assim sendo, os autores inseriram a seguinte equação de adsorção de umidade para o milho:

$$UR_{eq} = 100 \left\{ 1 - \exp \left[-0,518 (\theta + 45,6) U^{1,72} \right] \right\} \quad (86)$$

em que UR_{eq} = umidade relativa de equilíbrio para o produto no reumedecimento, (%).

A Equação 86 simula que, nas condições de reumedecimento, o produto terá um teor de água de equilíbrio inferior ao atingido durante a secagem, para as mesmas condições de temperatura e umidade relativa (MOREY *et al.*, 1979).

2.5 – Modelagem matemática

A formulação matemática da maioria dos problemas de engenharia, tais como distribuição de temperaturas, condução de calor em meios sólidos, condições de contorno e propriedades térmicas dependente do tempo, dentre outros, normalmente, conduz a um sistema de equações diferenciais ordinárias (E.D.O.) ou de equações diferenciais parciais (E.D.P.). As equações diferenciais parciais são classificadas de acordo com a seguinte fórmula:

$$F_1 \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} + F_2 \frac{\partial^2 L}{\partial x \partial y} + F_3 \frac{\partial^2 L}{\partial y^2} = f \left(x, y, L, \frac{\partial L}{\partial x}, \frac{\partial L}{\partial y} \right) \quad (87)$$

quando:

$F_1 F_3 - F_2^2 > 0$ a equação diferencial parcial é elíptica;

$F_1 F_3 - F_2^2 = 0$ a equação diferencial parcial é parabólica;

$F_1 F_3 - F_2^2 < 0$ a equação diferencial parcial é hiperbólica.

A resolução numérica das equações diferenciais parciais (E.D.P.) requer as condições iniciais (fornecem o valor da variável dependente no domínio espacial e no tempo determinado, e as condições de contorno do problema) que especificam o comportamento da variável dependente nos limites geométricos estabelecidos. Na escolha do método a ser utilizado, são consideradas as especificidades do problema e a natureza das equações. Normalmente, utilizam-se elementos finitos, diferenças finitas ou volumes finitos.

2.5.1 – Método dos volumes finitos

A metodologia utilizada por esse método consiste em dividir o domínio estudado em inúmeros volumes de controle sobre os quais serão realizados balanços de massa, energia e quantidade de movimento, de tal forma que para cada ponto da malha há um volume de controle. A discretização é feita por meio da integração (em relação ao volume e ao tempo para cada volume de controle) dos termos da equação que representa o fenômeno. Dessa forma, a equação discretizada contém os valores das variáveis estudadas para o conjunto de pontos da malha e a sua solução é válida para qualquer volume de controle do domínio (PATANKAR, 1980; MALISKA, 1995; NOVAES, 2005).

LIMA (1999) e CARMO (2004) usaram o método dos volumes finitos para discretizar a equação de difusão de calor e massa no interior de sólidos esferoidais prolatos e oblatos, respectivamente. FARIAS (2003) trabalhou com o método dos volumes finitos e o esquema “upwind” como função de interpolação para os termos convectivos, para simular a secagem de grãos de milho em um secador de fluxo cruzado. WU *et al.* (2004) empregaram o método dos volumes finitos para discretizar um modelo numérico tri-dimensional para simulação de secagem em regime transiente de sementes de arroz.

Algumas simplificações adotadas nos modelos de simulação de secagem são motivadas pelas dificuldades em reproduzir o fenômeno da secagem como um todo e pela impossibilidade de solucionar sistemas de equações mais complexos por meio de métodos tradicionais. O surgimento do computador e de técnicas de programação versátil permitiu, não só solucionar sistemas mais complicados, mas simular situações que se aproximam cada vez mais do fenômeno real. Os métodos numéricos vêm se

constituindo em uma ferramenta poderosa, por conseguir aliar facilidade de manuseio, velocidade de resposta e ampla aplicabilidade em problemas de engenharia. Evidentemente, também possui seus limites, assim como outros o possuem.

2.6 – Planejamento experimental

O planejamento experimental, também denominado de delineamento experimental, representa um conjunto de ensaios estabelecido com critérios científicos e estatísticos, com o objetivo de determinar a influência de diversas variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo (BUTTON, 2005; MONTGOMERY, 1996).

O delineamento de experimentos tem como objetivos:

- a) determinar o número ideal de experimentos que leve a obtenção de resultados com certo grau de confiabilidade;
- b) delimitar quais variáveis são mais influentes nos resultados;
- c) atribuir valores às variáveis influentes de modo a otimizar os resultados.

De acordo com BUTTON (2005), há três técnicas básicas para a definição dos ensaios num planejamento experimental:

- a) a réplica, que consiste na repetição de um ensaio sob condições preestabelecidas;
- b) a aleatorização ou randomização, é uma técnica de planejamento experimental puramente estatística em que a seqüência dos ensaios é aleatória;
- c) a técnica de blocos, em que a aleatorização é restringida à seqüência de ensaios interna dos blocos e não ao conjunto total de ensaios. Um bloco é uma porção do material experimental que tem como característica o fato de ser mais homogêneo que o conjunto completo do material utilizado.

DIAS *et al.* (2000), MARTINS (2000), RODRIGUES *et al.* (2002) e GOUVEIA *et al.* (2002), utilizaram o planejamento experimental para otimização de processos e determinação de melhores condições operacionais.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos de secagem do feijão-macáçar (*Vigna unguiculata* (L.) Walpers), foram realizados no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande.

3.1 – Matéria-prima

Utilizou-se o feijão-macáçar variedade sempre-verde, proveniente do sítio Campinote município de São Sebastião de Lagoa de Roça – PB. O produto foi colhido com teores médio de água de 20, 40 e 65 %, base úmida. As operações de debulha e limpeza foram feitas manualmente. Em seguida, os grãos foram embalados em sacos de plástico e armazenados à temperatura de 4 °C (± 1 °C). Durante o processo de seleção foram descartados grãos que apresentavam trincas, perfurações ou quaisquer danos em sua superfície.

3.2 – Propriedades físicas e parâmetros geométricos do feijão-macáçar

3.2.1 – Teor de água inicial

Para determinar o teor de água inicial do feijão-macáçar utilizou-se uma estufa à temperatura de 105 °C (± 1 °C) e uma balança digital com precisão de 0,01 gramas. Para cada teor de água inicial dos grãos, foram feitas três repetições, cada amostra contendo cerca de 20 a 30 gramas. O produto permanecia na estufa até atingir o peso constante. O teor de água inicial em base úmida foi encontrado por meio da seguinte equação:

$$U_i = \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \times 100 \quad (88)$$

3.2.2 – Massa específica aparente

Utilizou-se um recipiente cilíndrico feito com chapa de aço, medindo 0,104 m de diâmetro e 0,19 m de altura e, uma balança digital com precisão de 0,01 gramas. Foi colocada uma quantidade de grãos suficiente para preencher todo o volume do recipiente, determinou-se o volume ocupado pela massa de grãos (Equação 89), fez-se a pesagem e determinou-se a massa específica aparente do produto por meio da Equação 48. Para cada teor de água inicial do produto, foram feitas três repetições.

$$V = (\pi r^2 h) \quad (89)$$

Estudou-se, também, o comportamento da massa específica aparente durante a operação de secagem para grãos com teores médio de água de 20, 40 e 65 %, base úmida. Esses experimentos foram feitos à temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 0,6 m/s. A cada trinta minutos faziam-se a pesagem, calculava-se o volume e determinava-se o teor de água da massa de grãos. Os experimentos foram conduzidos até o produto atingir um teor de água médio de 10 %, base úmida.

3.2.3 – Volume do grão

Foram utilizadas duas metodologias para encontrar o volume do grão: a primeira foi pelo método do deslocamento de líquido (hexano), ou seja, a diferença entre a massa do líquido contendo o grão submerso e a massa do líquido sem o grão, dividida pela massa específica do líquido, fornece o volume do grão. Para registrar a variação da massa do líquido e do grão foi utilizada uma balança digital com precisão de 0,0001 gramas. A segunda metodologia consistiu na medição dos três eixos ortogonais – comprimento, largura e espessura – do grão de feijão-macáçar, por meio de um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. Nesse caso, considerou-se o grão de feijão um elipsóide triaxial ($a \neq b \neq c$), sendo convencionado que os parâmetros a, b e c são os semi-eixos que constituem as três dimensões, conforme Figura 3. Nos dois métodos utilizados, foram feitas trinta repetições para cada teor de água, cada amostra com trinta grãos escolhidos aleatoriamente. O valor adotado como padrão para o volume do grão, foi a média aritmética dos trinta valores encontrados.

O volume de um elipsóide escaleno foi calculado pela Equação 90 (PROVENZA, 1985).

$$V = \frac{4}{3} \pi (abc) \quad (90)$$

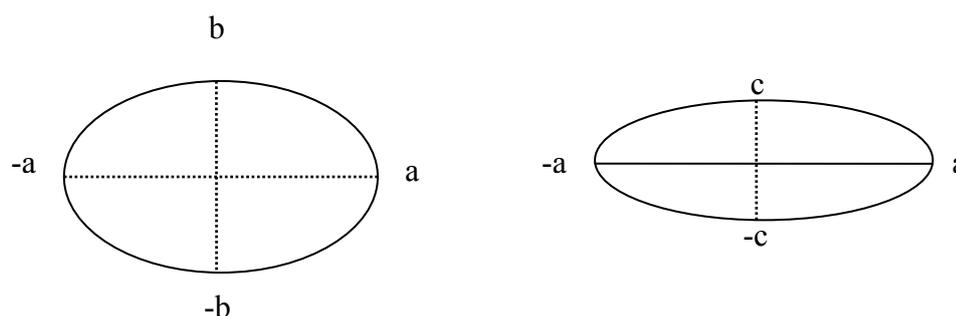


Figura 3 - Desenho esquemático de um elipsóide genérico.

3.2.4 – Massa específica real

A razão entre a massa e o volume do grão (Equação 48), ambos obtidos no experimento descrito no item anterior, fornece a massa específica real do produto. A média aritmética das trinta repetições foi adotada para escolha do valor padrão.

3.2.5 – Área superficial

A área superficial de um elipsóide escaleno foi determinada por meio da equação seguinte (WIKIPÉDIA, 2006).

$$S = 4\pi \left(\frac{a^L b^L + a^L c^L + b^L c^L}{3} \right)^{1/L} \quad (91)$$

Para $L = 1,6075$ resulta num erro relativo máximo de cerca de 1,061 % (fórmula de Knud Thomsen); um valor de $L = 1,6$ resulta num erro relativo máximo de 1,178 % (fórmula de David W. Cantrell).

3.2.6 – Área específica

A área específica de um esferóide foi determinada pela razão entre a área superficial e seu respectivo volume, conforme Equação 56.

3.2.7 – Porosidade

Utilizou-se a Equação 49 para determinar a porosidade dos grãos.

3.2.8 – Calor específico

3.2.8.1 - Equipamentos utilizados

- Balança digital modelo HR-200, precisão de quatro casas decimais;
- Termômetro digital e termopar tipo “k”;
- Calorímetro.

3.2.8.2 - Metodologia

Foi utilizado um calorímetro e o método das misturas para determinar o calor específico do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 5, 10, 20, 40 e 65 %, base úmida. Para determinar a capacidade calorífica do calorímetro misturou-se 120 gramas de água destilada à temperatura de 5 °C com 120 gramas de água à temperatura ambiente. O recipiente foi fechado e o líquido foi agitado durante quinze minutos. Depois desse tempo, registrou-se a temperatura e determinou-se a capacidade calorífica por meio da seguinte equação:

$$c_w m_1 (T_1 - T_2) + C_{cal} (T_1 - T_3) = c_p m_2 (T_3 - T_2) \quad (92)$$

em que

c_w = calor específico da água, J/kg °C;

c_p = calor específico do produto, J/kg °C;

m_1 = massa da água a temperatura ambiente, g;

m_2 = massa da água gelada, g;

T_1 = temperatura da água natural, °C;

T_2 = temperatura da água gelada, °C;

T_3 = temperatura de equilíbrio da mistura, °C;

C_{cal} = capacidade calorífica do calorímetro, J/kg °C.

Para determinação do calor específico foram colocadas 120 gramas do produto dentro da mistura contida no calorímetro e agitou-se a mistura por quinze minutos. O balanço de energia foi efetuado por meio da seguinte equação:

$$m_p c_p (T_4 - T_5) = c_w m_a (T_5 - T_3) = C_{cal} (T_5 - T_3) \quad (93)$$

em que

m_p = massa do produto, kg;

c_p = calor específico do produto, J/kg °C;

c_w = calor específico da água, J/kg °C;

m_a = massa da água, kg;

C_{cal} = capacidade calorífica do calorímetro, J/kg °C;

T_4 = temperatura do produto, °C;

T_5 = temperatura de equilíbrio térmico entre a massa de água e a massa de produto, °C.

3.2.9 - Determinação das curvas de teor de água de equilíbrio

Os experimentos para obtenção dos valores do teor de água de equilíbrio do produto foram realizados no Laboratório de Transferência de Calor e Massa em Meios Porosos do Departamento de Engenharia Química, DEQ/UFCG/ Campus I.

3.2.9.1 - Equipamentos utilizados

- Balança digital modelo HR-200, com precisão de quatro casas decimais;
- Estufa com remoção e circulação de ar, modelo MA035, marca MARCONI, capacidade de aquecimento até 200 ± 1 °C e velocidade do ar de 1,6 m/s;
- Novasina (equipamento que possibilita a leitura direta da umidade relativa de equilíbrio do produto), que opera com temperaturas de 0 a 50 °C.

3.2.9.2 - Procedimento experimental

Foram determinadas umidades relativas de equilíbrio nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C. Para cada temperatura foram preparadas cinco amostras contendo, cada uma, quinze grãos de feijão-macáçar verde, com teor médio de água de 65 %, base úmida. As amostras foram colocadas na estufa a 70 °C e foram sendo retiradas em horários distintos e colocadas em um dessecador contendo sílica, por um período médio de 5 a 10 minutos. Depois desse período, cada amostra era colocada no Novasina para determinação da umidade relativa de equilíbrio à temperatura previamente definida. Ao final do experimento, as amostras foram deixadas por um período de setenta e duas horas em uma estufa à temperatura de 105 °C (± 1), para determinação da massa de sólido seco.

O teor de água de equilíbrio foi calculado pela seguinte equação:

$$U_{eq} = \frac{m_{eq} - m_{ss}}{m_{ss}} \quad (94)$$

Os valores experimentais dos teores de água de equilíbrio foram utilizados para ajustar os modelos de Henderson-Thompson (Equação 32), Chung-Pfost modificado (Equação 33), Oswin modificado (Equação 35), Halsey modificado (Equação 36) e Henderson-Thompson modificado por Cavalcanti Mata (Equação 37).

Os modelos matemáticos foram analisados tomando-se como parâmetro o valor do coeficiente de determinação (R^2), do desvio percentual médio (DPM) e do erro relativo (η), expressos por:

$$DPM = \frac{100}{v} \sum_{i=1}^n \frac{|(U_{exp} - U_{cal})|}{U_{cal}} \quad (95)$$

$$\eta = \frac{U_{exp} - U_{cal}}{U_{cal}} \cdot 100 \quad (96)$$

O ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais foi feito por meio do programa STATISTICA, versão 5, utilizando-se análise de regressão não linear, pelos métodos de Newton e Hooke-Jeeves/Newton, e critério de convergência de 0,0001.

3.2.10 – Calor latente de vaporização

A partir dos dados de umidade relativa de equilíbrio, determinaram-se as umidades relativas do ar para os teores de água de equilíbrio de 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 %, base seca, e temperaturas de 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50 °C. A pressão de vapor de saturação, a pressão parcial do vapor de água e o calor latente de vaporização da água foram determinados, respectivamente, pelas equações:

$$P_{vs} = \exp \left[b_4 - \frac{b_5}{T_{abs}} - b_6 \ln(T_{abs}) \right] \quad (97)$$

$$P_v = UR \times P_{vs} \quad (98)$$

$$h_{fg} = (598 - 0,57 T) \quad (99)$$

Segundo ROSSI (1987), para temperaturas entre 0 e 70 °C as constantes da Equação 97 assumem os seguintes valores:

$$b_4 = 60,43;$$

$$b_5 = 6834,27;$$

$$b_6 = 5,17.$$

Aplicou-se o logaritmo neperiano aos dados da pressão de vapor de saturação e da pressão parcial do vapor de água, traçou-se o gráfico dos valores de $\ln(P_v)$ em função de $\ln(P_{vs})$ e encontrou-se uma reta com coeficiente angular definido para um dado teor de água de equilíbrio e temperatura; multiplicou-se o valor do coeficiente angular da reta (b) pelo calor latente de vaporização da água e obteve-se o calor latente de vaporização da água do feijão-macáçar em função da temperatura e do teor de água de equilíbrio, conforme a seguinte equação:

$$h_{fg}^* = h_{fg} \times b \quad (100)$$

3.3 – Equação de secagem em camada fina

Com a finalidade de estudar a influência da temperatura, do teor de água inicial e da velocidade do ar sobre as constantes da equação de secagem em camada fina e a taxa de secagem do produto, elaborou-se uma matriz experimental obedecendo a um planejamento fatorial 2^3 com mais três experimentos no ponto central, totalizando em onze experimentos, conforme Tabela 3. Os níveis reais e codificados encontram-se na Tabela 4. Para análise dos dados experimentais utilizou-se o programa STATISTICA, versão 5.

Tabela 3 – Matriz de planejamento experimental.

Experimentos	T _{ar}	T _{água}	V _{ar}
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	1	+1	+1
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0

T_{ar} = temperatura do ar de secagem, °C;

T_{água} = teor de água inicial do produto, % base úmida;

v_{ar} = Velocidade do ar, m/s.

Tabela 4 – Níveis reais e codificados das variáveis estudadas

Variáveis	Níveis		
	-1	0	+1
T _{ar}	40	55	70
T _{água}	20	40	65
v _{ar}	0,2	0,5	0,8

Os experimentos foram feitos em um secador de camada fina dotado de um sistema de controle digital de temperatura e velocidade do ar. Utilizou-se para cada experimento 700 gramas de feijão-macáçar, e adotaram-se os parâmetros físicos definidos na Tabela 4. Nas primeiras duas horas do experimento fazia-se a pesagem do produto a cada quinze minutos, na fase seguinte à pesagem foi feita a cada trinta minutos. A secagem foi encerrada quando a variação de peso da amostra ocorria na terceira casa decimal. Para efetuar a pesagem do produto foi utilizada uma balança digital modelo HR-200 com precisão de quatro casas decimais. Depois da secagem colocava-se o produto em uma estufa à temperatura de 105 °C (± 1), por um período de setenta e duas horas, para determinação do teor de água do produto ao final do experimento.

Durante a fase preliminar do trabalho, foram testadas algumas equações de camada fina, optando-se pela equação de Page (Equação 25) por ter proporcionado melhores ajustes aos dados experimentais das curvas de secagem.

3.4 – Secagem em camada espessa

3.4.1 - Secador

Para realizar a parte experimental da secagem em camada espessa foi projetado e construído um secador em escala laboratorial para secagem em camada espessa e em camada fina, simultaneamente, com capacidade para secar oito quilos de grão em camada espessa e um quilo em camada fina.

O conjunto secador consiste das seguintes partes:

a) sistema de ventilação é feito por um turbo compressor com capacidade de 724 W, modelo trifásico, 3400 rotações por minuto. O controle de fluxo é feito por meio de

dois registros de gaveta, sendo um destinado para o secador de camada fina e o outro para o secador de camada espessa;

b) sistema de aquecimento composto de três resistências elétricas de 2000 W, todas blindadas e acondicionadas em um tubo galvanizado de 110 mm de diâmetro por 700 mm de comprimento, isoladas termicamente com manta de amianto, e comandadas por um termostato de temperatura;

c) quadro elétrico de distribuição e comandos com chave de proteção para todo o sistema;

d) secador construído de madeira e medindo 95 cm de comprimento e 35 cm de altura, projetado para funcionar na posição horizontal, com isolamento térmico feito com manta de amianto, internamente, e dividido em quatro compartimentos independentes, doravante denominados de câmara de secagem. Cada câmara de secagem possui duas entradas para colocação de sensores para medição de temperatura e umidade relativa do ar, e o fluxo de ar atravessa as câmaras de secagem no sentido longitudinal, conforme Figura 4. A numeração contida na referida Figura 4 (1, 2, 3 e 4) faz referência às câmaras de secagem;

e) quatro caixas feitas de madeira e tela de arame (malha 6), cada uma medindo 25 cm de altura e 15 cm de largura, com capacidade para armazenar dois quilogramas de grãos. Essas caixas são abastecidas individualmente e colocadas no interior da câmara de secagem, conforme ilustra a Figura 5;

f) conjunto de quatro balanças digitais, cada uma com capacidade para 10 kg e precisão de duas casas decimais, uma para cada câmara de secagem, que permite o acompanhamento do peso da amostra sem precisar retirá-la do secador. As balanças possuem saída serial que permitem a aquisição automatizada dos dados.

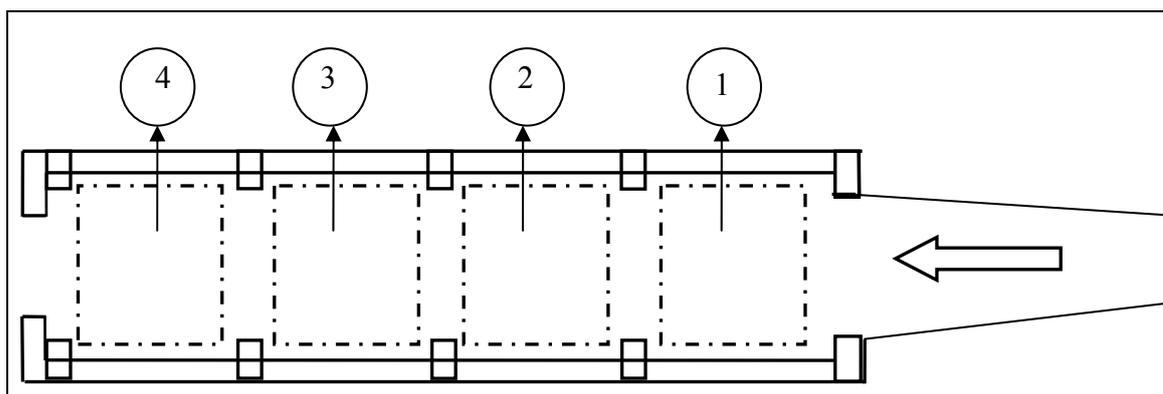


Figura 4 – Desenho esquemático com vista superior do secador

A Figura 5 permite visualizar o posicionamento das balanças em relação ao secador. A Figura 6 mostra o conjunto completo.

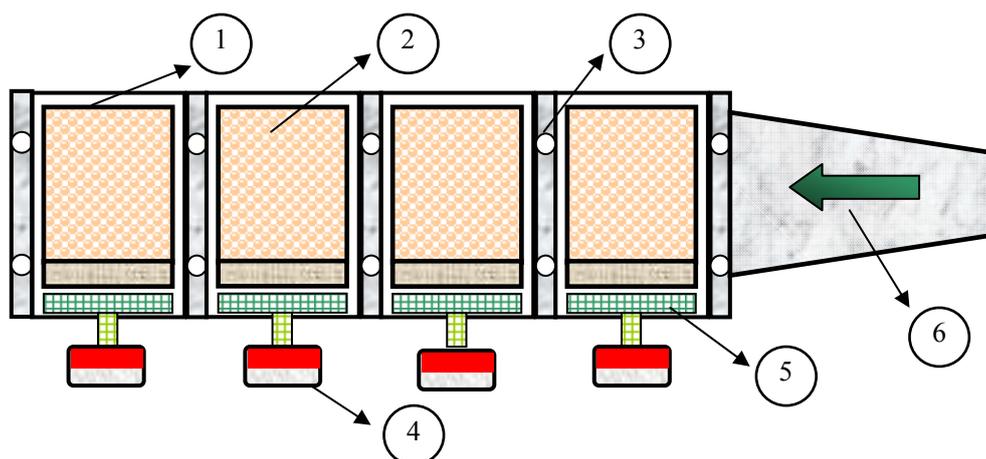


Figura 5 – Desenho esquemático com vista lateral do secador.

Os itens numerados da Figura 5 equivalem aos seguintes componentes:

- 1 - câmara de secagem;
- 2 - caixa de madeira para colocação dos grãos no interior da câmara de secagem;
- 3 - entrada para sensores de temperatura e umidade;
- 4 - balança digital;
- 5 - parte superior da balança sobre a qual fica apoiada a caixa que contém o produto;
- 6 - cone feito em chapa de alumínio para homogeneização do ar de secagem.

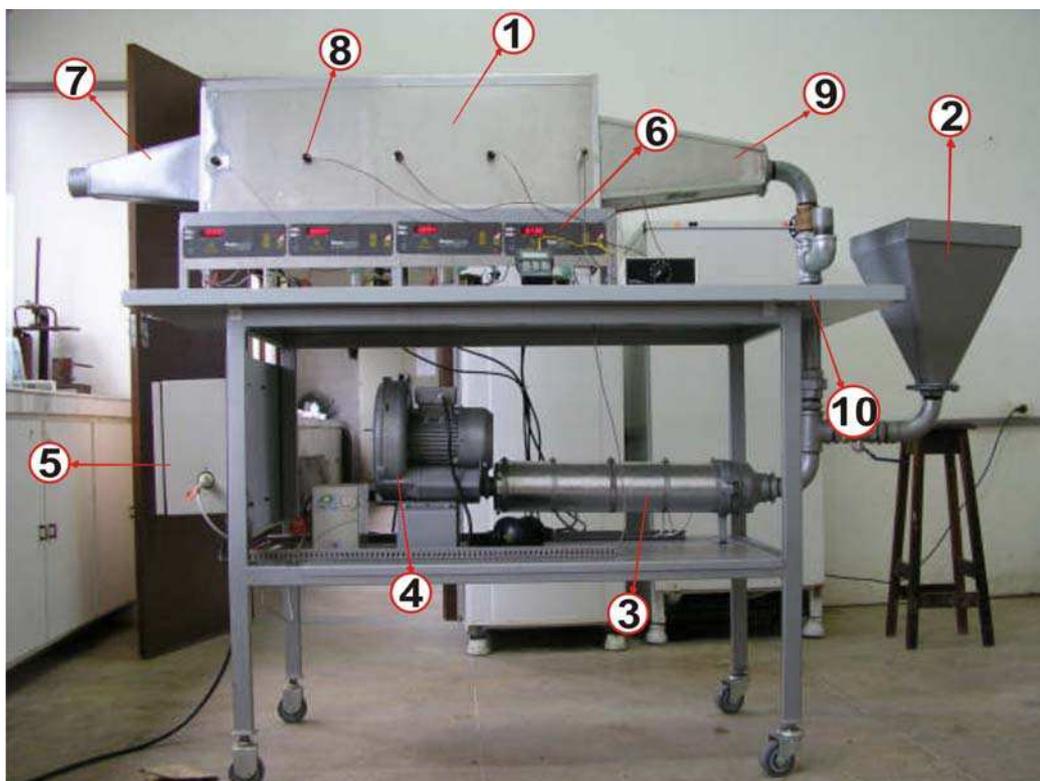


Figura 6 – Secador em escala laboratorial para secagem em camada espessa e em camada fina.

Os itens numerados da Figura 6 equivalem aos seguintes componentes:

- 1 - câmara de secagem;
- 2 - recipiente para secagem em camada fina;
- 3 - duto de ferro galvanizado contendo resistências para aquecimento do ar;
- 4 - turbo compressor;
- 5 - quadro elétrico de distribuição e comandos;
- 6 - balança;
- 7 - saída de ar;
- 8 - entrada para sensores de temperatura e umidade;
- 9 - entrada de ar secagem;
- 10 – registros para controle do fluxo de ar.

3.4.2 - Equipamentos utilizados durante os experimentos

a) Termômetro digital dotado de seletor de canais com capacidade para leitura em dez pontos distintos, utilizado para acompanhamento da temperatura na entrada e na saída de cada câmara de secagem;

b) Higrômetro digital para leitura da umidade relativa do ar durante a secagem;

c) Anemômetro digital para registrar a velocidade do ar de secagem na entrada e na saída do secador;

d) Estufa trabalhando à temperatura de 105 °C para determinação do teor de água do produto ao término do experimento.

3.4.3 – Procedimento experimental durante a secagem do produto

As amostras foram retiradas da câmara fria doze horas antes do início da secagem para se poder trabalhar com o produto com a mesma temperatura do ar ambiente. Antes de colocar o produto no interior das câmaras de secagem, procedia-se à regulagem da temperatura e do fluxo de ar no secador. Durante a operação de secagem, monitoravam-se a umidade relativa do ar, a temperatura ambiente e a velocidade do ar na entrada e na saída da câmara de secagem. Fez-se a secagem do produto com teor de água inicial médio de 21,5, 40 e 64 %, base úmida, e espessura da camada com 60 cm, compreendendo quatro camadas de 15 cm, uma em cada câmara de secagem. Até duas horas de secagem a coleta dos dados – temperatura na entrada e na saída de cada câmara de secagem, temperatura e peso do produto - foi feita a cada cinco minutos, a partir da terceira hora, a cada 10 minutos, na fase seguinte se acrescentava 10 minutos a cada hora que durasse o experimento. A temperatura utilizada foi de 40, 50, 60 e 70 °C, e velocidade do ar de secagem na entrada do secador de 0,5 e 0,7 m/s. Ao final do processo de secagem retiravam-se quatro amostras do produto, uma em cada camada, e colocava-se na estufa por setenta e duas horas para verificação do teor de água. Em todos os experimentos a secagem foi conduzida até que o produto contido na quarta câmara de secagem atingisse um teor de água médio de 12 %, base úmida.

3.5 – Simulação de secagem

Foram utilizados os modelos de THOMPSON *et al.* (1968) e o proposto por BAKKER-ARKEMA *et al.* (1974), conhecido como modelo da Universidade Estadual de Michigan (M.S.U.), com as modificações introduzidas por NOVAES (2005).

3.5.1 – Modelo de Michigan

Tomando como base o modelo proposto por BAKKER-ARKEMA *et al.* (1974), - Modelo da Universidade Estadual de Michigan (M.S.U.) – para secagem de grãos em leito fixo, NOVAES (2005) desenvolveu um modelo matemático para secagem em leito fixo do casulo do bicho-da-seda, que além de incorporar as especificidades do modelo original, durante a realização dos balanços de massa e energia para o ar e para o produto, considera:

- a) a variação das propriedades físicas do ar e do produto durante o processo de simulação;
- b) o efeito da porosidade;
- c) a condensação do vapor de água no interior da massa de grãos;
- d) a inclusão de todos os termos transientes aplicados ao produto e ao ar.

A posição da camada de grãos e o sentido do fluxo de ar no interior do secador podem ser visualizados na Figura 7.

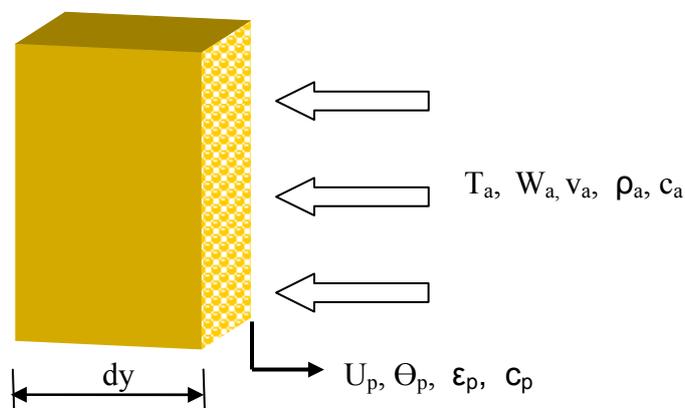


Figura 7 – Desenho esquemático em perspectiva da posição da camada de grãos e do fluxo de ar no interior do secador.

O equacionamento dos balanços de energia e massa é descrito da seguinte forma:

a) balanço de energia para o ar

$$-\frac{\partial[(\rho_a v_a c_a + v_a W c_v)T]}{\partial y} = A_e h_c (T - \bar{\theta}) + \frac{\partial[(\rho_a c_a + \rho_a W c_v \varepsilon)T]}{\partial t} \quad (101)$$

b) balanço de energia para o produto

$$A_e h_c (T - \bar{\theta}) = (\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{U}) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} - \left[h_{fg}^* + c_v (T - \bar{\theta}) \right] \rho_p \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} \quad (102)$$

c) balanço de massa para o ar

$$\frac{\partial(\rho_a v_a W)}{\partial y} - \frac{\partial(\varepsilon \rho_a W)}{\partial t} = \rho_p \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} \quad (103)$$

d) balanço de massa para o produto

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -K N t^{N-1} \text{Exp}(-K t^N) (U_i - U_{eq}) \quad (104)$$

Os parâmetros da Equação 104 foram obtidos por meio do programa STATISTICA, versão 5, utilizando-se análise de regressão não linear, método de Newton, e critério de convergência de 0,0001, a partir dos dados experimentais de secagem.

O modelo de secagem proposto utiliza as seguintes condições de contorno:

$$\begin{aligned} T(y=0, z, t) &= T_{ent} & x(y=0, z, t) &= x_{ent} \\ \bar{U}(y, z, t=0) &= \bar{U}_0 & \bar{\theta}(y, z, t=0) &= \bar{\theta}_0 \end{aligned}$$

3.5.1.1 – Método utilizado para resolver o conjunto de equações resultante dos balanços de energia e massa

O conjunto de equações diferenciais resultantes dos balanços de energia e massa efetuados para o sistema em estudo (Equações 101 a 104) foi integrado no volume e no tempo, obtendo-se, assim, um sistema de equações lineares. A discretização das equações diferenciais foi feita pelo método dos volumes finitos, utilizando-se uma formulação explícita e a função de interpolação espacial “upwind”. Na Figura 8 encontram-se o esquema numérico e o volume de controle utilizado.

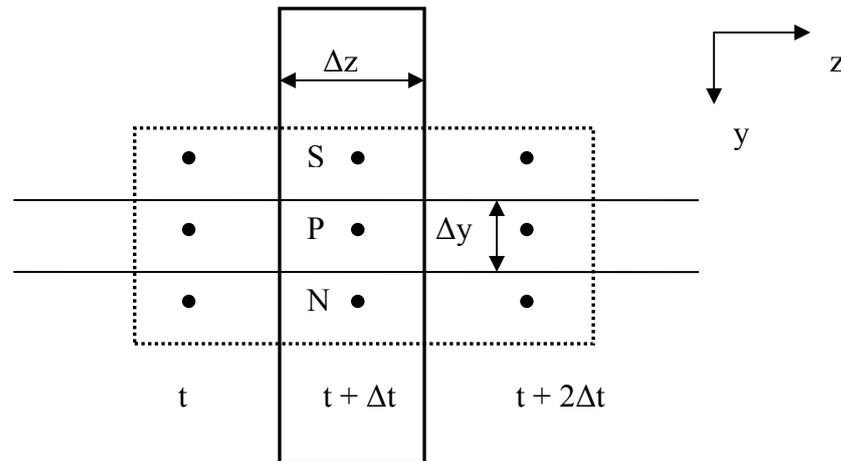


Figura 8 – Esquema numérico e volume de controle

O sistema de equações lineares discretizadas foi descrito como:

a) balanço de energia para o ar

$$A_p T_p = A_s T_s + A_p^0 T_p^0 + S_c^T \quad (105)$$

em que

$$A_p = \frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{v_a}{\varepsilon} + \frac{A_e h_c \Delta y}{\varepsilon (\rho_a c_a + \rho_a W c_v)} \quad (105a)$$

$$A_s = \frac{V_a}{\varepsilon} \quad (105b)$$

$$A_p^0 = \frac{A^* h_c \Delta y}{\varepsilon (\rho_a c_a + \rho_a x c_v)} \quad (105c)$$

$$S_c^T = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (105d)$$

b) balanço de energia para o produto

$$A_p \bar{\theta}_P = A_p^0 \bar{\theta}_P^0 + S_c^0 \quad (106)$$

em que

$$A_p = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} + \frac{h_c A_e \Delta z}{\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{U}} + \frac{c_v \rho_P \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} \Delta z}{\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{U}} \quad (106a)$$

$$A_p^0 = \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad (106b)$$

$$S_c^0 = \frac{\left(h_{fg}^* + c_v T_P \right) \rho_P \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} \Delta z}{\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{U}} + \frac{h_c A_e \Delta z}{\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{U}} \quad (106c)$$

c) balanço de massa para o ar

$$A_p W_P = A_s W_s + A_p^0 W_P^0 + S_c^x \quad (107)$$

em que

$$A_p = \rho_a \frac{\Delta y}{\Delta t} + \rho_a \frac{v_a}{\varepsilon} \quad (107a)$$

$$A_s = -\rho_a \frac{v_a}{\varepsilon} \quad (106b)$$

$$A_p^0 = \rho_a \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (107c)$$

$$S_c^x = \frac{\rho_p}{\varepsilon} \frac{\partial U}{\partial t} \Delta y \quad (107d)$$

d) balanço de massa para o produto

$$A_p U = A_p^0 U_p^0 + S_c^U \quad (108)$$

em que

$$A_p = \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad (108a)$$

$$A_p^0 = \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad (108b)$$

$$S_c^U = b_4 b_5 t^{b_5 - 1} \exp(b_4 t^{b_5}) \Delta z \quad (108c)$$

3.5.1.2 – Tamanho da malha

Trabalhou-se com uma malha de vinte pontos na direção de y e um ponto na direção z. Para efetuar a simulação do processo de secagem em camada fixa, foi utilizado um programa no ambiente “Mathematica” desenvolvido por NOVAES (2005) e adaptado para ser usado neste trabalho.

3.5.1.3 - Propriedades termodinâmicas do ar e da água

Durante o processo de simulação, as propriedades físicas do produto e termodinâmicas do ar e da água foram calculadas pelas seguintes equações:

a) calor específico do ar (kJ/kgK) (JUMAH *et al.* 1996)

$$c_a = 1,00926 - (44,04033 \times 10^{-5} T) + (6,17596 \times 10^{-7} T^2) - (4,0972 \times 10^{-10} T^3) \quad (109)$$

b) massa específica do ar (kg/m³) (ROSSI, 1987)

$$\rho_a = \frac{P_{atm} M_a}{R_o T_{abs}} \quad (110)$$

c) umidade relativa do ar (ROSSI, 1987)

$$UR = \frac{P_{atm} W}{(W + 0,622) P_{vs}} \quad (111)$$

d) pressão de vapor de saturação (Pa) (ROSSI, 1987)

$$P_{vs} = R \exp \left\{ \frac{A + B T_{abs} + C T_{abs}^2 + D T_{abs}^3 + E T_{abs}^4}{F T_{abs} - G T_{abs}^2} \right\} \quad (112)$$

$$R = 22105649,25;$$

$$A = -27405,526;$$

$$B = 97,5413;$$

$$C = -0,146244;$$

$$D = 0,12558 \times 10^{-3};$$

$$E = -0,48502 \times 10^{-7};$$

$$F = 4,34903;$$

$$G = 0,39381 \times 10^{-2}.$$

e) calor específico da água

O calor específico da água na fase líquida (c_w) e na fase de vapor (c_v) foi determinado por JUMAH *et al.* (1996), respectivamente, por meio das seguintes equações:

$$c_w = 2,82232 + (1,18277 \times 10^{-2} T_{abs}) - (3,5047 \times 10^{-5} T_{abs}^2) + (3,6010 \times 10^{-8} T_{abs}^3) \quad (113)$$

$$c_v = 1,8830 - (0,16737 \times 10^{-3} T_{abs}) + (0,84386 \times 10^{-6} T_{abs}^2) - (0,26966 \times 10^{-9} T_{abs}^3) \quad (114)$$

f) coeficiente de transferência de calor

O coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$) utilizado foi baseado no obtido por INCROPERA e DeWitt, (1992) para um leito de partículas esféricas conforme a seguinte equação:

$$h_c = \left(\frac{k_a}{d_p} \right) \left(2 + 0,6 \text{ Re}^{0,5} \text{ Pr}^{1/3} \right) \quad (115)$$

em que

k_a = condutividade térmica do ar;

d_p = diâmetro de uma esfera de igual volume do sólido;

Re = número de Reynolds;

Pr = número de Prandtl.

g) área específica do produto (FARIAS, 2003)

$$A_e = \frac{S(1-\varepsilon)}{V} \quad (116)$$

h) teor de água de equilíbrio do produto

Foi utilizada a equação de Henderson-Thompson modificado por Cavalcanti Mata (Equação 37).

3.5.2 – Modelo de Thompson

Para utilizar o modelo de THOMPSON *et al.* (1968) trabalhou-se com um programa desenvolvido por CAVALCANTI MATA e DANTAS (1989), (SASG – Software Aplicado a Simulação de Secagem de Grãos) em que as propriedades termodinâmicas do ar e da água são calculadas pelas seguintes equações:

a) **volume específico do ar** (m^3/kg de ar seco)

$$v_{esp} = \frac{2,153(T_{abs})(1+1,6078W)}{P_{atm}} \quad (117)$$

b) **umidade absoluta do ar** (kg de vapor de água / kg de ar seco)

$$W = \frac{0,622 P_v}{P_{atm} - P_v} \quad (118)$$

c) **pressão parcial de vapor** (kcal/kg)

$$P_v = \frac{14,696W}{0,6219 + W} \quad (119)$$

d) **umidade relativa do ar** (decimal)

$$UR = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (120)$$

e) **pressão de vapor de saturação**

(Equação 97)

f) entalpia do ar (kcal/kg)

$$E = 0,24T_{abs} + (597,6 + 0,45T_{abs})W \quad (121)$$

As propriedades físicas do produto foram calculadas pelas equações:

a) calor específico do produto (kcal/kg °C)

$$c_p = 0,35151 + (0,00158U) \quad (122)$$

b) calor latente de vaporização da água do produto (kcal/kg)

$$h_{fg} = (598 - 0,57T)(1 + 4,022198(\exp(-0,005807 * U))) \quad (123)$$

c) o tempo equivalente é calculado pela equação

$$t_{eq} = \exp\left[\left(\frac{1}{N}\right) \left(\ln\left(\frac{RU}{K}\right)\right)\right] + \Delta t \quad (124)$$

d) equação de camada fina

(Equação 25)

e) teor de água de equilíbrio do produto

(Equação 37)

O SASG (Software Aplicado a Simulação de Secagem de Grãos) foi desenvolvido no ambiente do Delphi 5.0 e foi escrito em Pascal.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Propriedades físicas e parâmetros geométricos do produto

Na Tabela 5 encontram-se os valores médios das propriedades físicas e dos parâmetros geométricos do feijão-macáçar, para os teores médios de água inicial de 21, 40 e 65 %, base úmida. Os dados experimentais referentes ao volume e a massa específica real encontram-se nos ANEXOS 1, 2 e 3, e os referentes à área superficial encontram-se nos ANEXOS 4, 5 e 6.

Tabela 5 – Valores médios das propriedades físicas e dos parâmetros geométricos do feijão-macáçar.

Propriedades	Teor médio de água inicial (% base úmida)			Unidades
	21	40	65	
Massa específica aparente	786,5	747,6	658,5	kg/m ³
Massa específica real	1254,15	1246,0	1198,0	kg/m ³
Volume do grão	2,251x10 ⁻⁷	2,285x10 ⁻⁷	3,516x10 ⁻⁷	m ³
Área superficial	0,000183	0,000175	0,000228	m ²
Área específica	812,97	765,86	648,45	m ² /m ³
Porosidade	0,37	0,40	0,55	decimal

4.1.1 - Massa específica aparente

De acordo com as curvas contidas na Figura 9, obtidas a partir dos modelos ajustados, verifica-se que a massa específica aparente do feijão-macáçar tende a diminuir à medida que ocorre um decréscimo no seu teor de água, isso significa que durante o processo de secagem, a redução da massa é maior que a redução do volume. COUTO *et al.* (1999) também observaram esse comportamento em duas variedades de café colhidas com teor médio de água inicial entre 9,5 e 68 %, base úmida. TAIWO *et al.* (1996) utilizaram feijão-macáçar com teor médio de água inicial variando de 9,1 a 41 %, em base seca, e também observaram esse comportamento da massa específica aparente do feijão-macáçar em função do seu teor de água. Os dados experimentais e os preditos encontram-se no ANEXO 7.

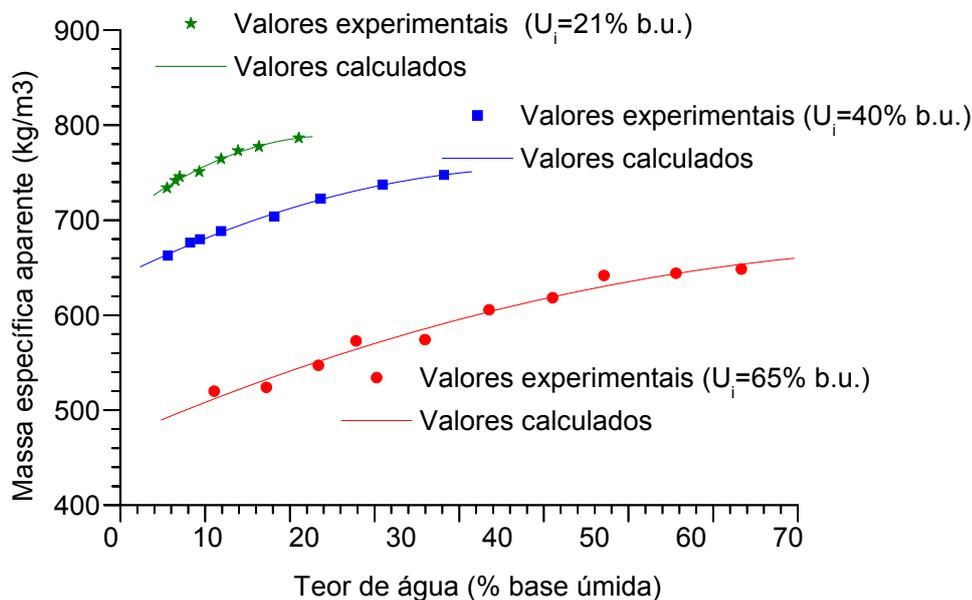


Figura 9 – Variação da massa específica aparente do feijão-macáçar em função do seu teor de água.

Um modelo linear de segundo grau foi ajustado aos dados experimentais de massa específica aparente do feijão-macáçar com teores médios de água inicial de 21, 40 e 65 %, em base úmida, obtendo-se, respectivamente, as seguintes equações:

$$\rho_{ap} = 700.98 + (7.004 U_{bu}) - (0.1397 U_{bu}^2); R^2 = 0,991 \quad (125)$$

$$\rho_{ap} = 640.55 + (4.41 U_{bu}) - (0.0428 U_{bu}^2); R^2 = 0,996 \quad (126)$$

$$\rho_{ap} = 471.7 + (4.38 U_{bu}) - (0.0241 U_{bu}^2); R^2 = 0,975 \quad (127)$$

4.1.2 – Teor de água de equilíbrio

Os valores das umidades relativas de equilíbrio contidos na Tabela 6 representam um valor médio de três repetições para cada temperatura estudada. Os dados experimentais e os estimados pelos modelos ajustados são apresentados no ANEXO 8.

Tabela 6 – Valores experimentais do teor de água de equilíbrio higroscópico de grãos de feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 65 % ($\pm 1\%$), base úmida, obtidos por dessorção.

Umidade relativa (decimal)	Temperatura (°C)			
	20	30	40	50
	Teor médio de água de equilíbrio (% base)			
0,85	29,45	26,80	25,50	23,70
0,75	23,30	20,60	19,91	18,30
0,65	18,86	17,10	15,80	13,55
0,55	15,30	12,45	11,80	11,05
0,45	12,60	11,53	10,45	9,61
0,35	10,09	8,85	9,30	7,76
0,25	8,50	7,31	7,20	6,30
0,20	6,32	6,23	6,25	5,70
0,10	3,75	3,18	2,66	2,43

Os valores dos parâmetros das equações ajustadas aos dados experimentais, do coeficiente de determinação (R^2) e do desvio percentual médio (DPM) estão contidos na Tabela 7. De acordo com os valores do coeficiente de determinação e do desvio percentual médio, os modelos de Henderson-Thompson e Henderson-Thompson modificado por Cavalcanti Mata foram os que proporcionaram os melhores ajustes. Quanto aos modelos de Halsey e Oswin modificados, mesmo apresentando um coeficiente de determinação menor que os dois primeiros citados, os desvios entre os dados experimentais e os preditos estão próximos de 10 %. Logo, pode-se afirmar que o ajuste propiciado por estes dois modelos foi apenas razoável. Já quanto ao modelo de

Chung-Pfost modificado, pode-se afirmar que o ajuste foi insatisfatório. Basta comparar o valor do desvio percentual médio entre os dados experimentais e os preditos.

Tabela 7 – Valores dos parâmetros, do coeficiente de determinação (R^2) e do desvio percentual médio (DPM), dos modelos utilizados na análise dos dados experimentais.

Modelos	Parâmetros			R^2	DPM (%)
	a	b	c		
Henderson modificado por Cavalcanti Mata	0,006057	0,36505	1,376796	0,991	5,82
Henderson-Thompson	0,000246	54,1022	1,376941	0,991	5,83
Oswin modificado	15,26307	-0,096817	0,470924	0,98	6,61
Halsey modificado	2,48392	0,008074	1,638991	0,97	9,80
Chung-Pfost modificado	250,8760	47,34168	0,116362	0,98	12,60

AJIBOLA *et al.* (2003) utilizaram o modelo de Henderson-Thompson para ajustar as isotermas de feijão-macáçar e encontraram um valor de 5,8 % para o desvio percentual médio (DPM), valor muito próximo ao encontrado neste trabalho. Dos modelos utilizados pelos autores, o modelo de Henderson-Thompson foi o que apresentou menor desvio percentual médio.

As curvas (Figuras 10 e 11) obtidas pelos modelos de Henderson-Thompson e Henderson-Thompson modificado por Cavalcanti Mata, respectivamente, mostram um comportamento mais uniforme para as quatro temperaturas estudadas, quando comparados com os modelos de Oswin, Halsey e Chung-Pfost modificados (Figuras 12, 13 e 14).

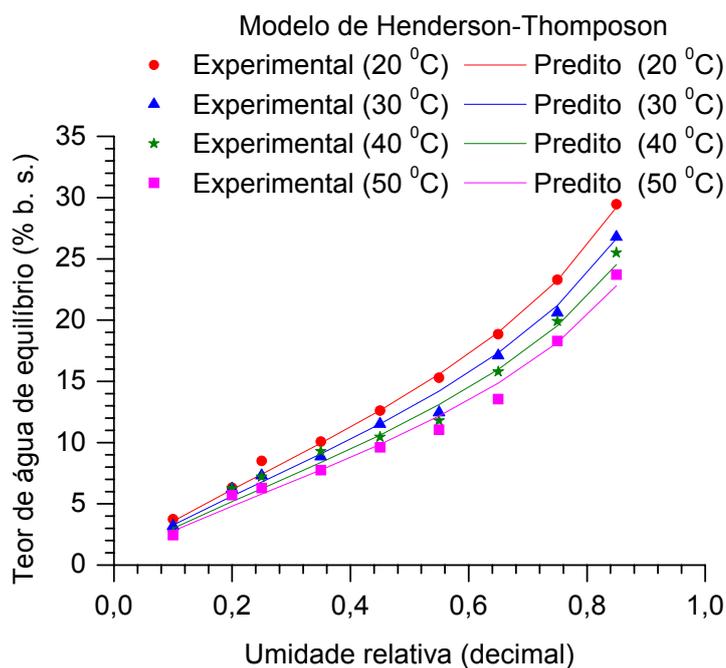


Figura 10 – Valores experimentais e preditos pelo modelo de Henderson-Thompson das isotermas de equilíbrio do feijão-macáçar.

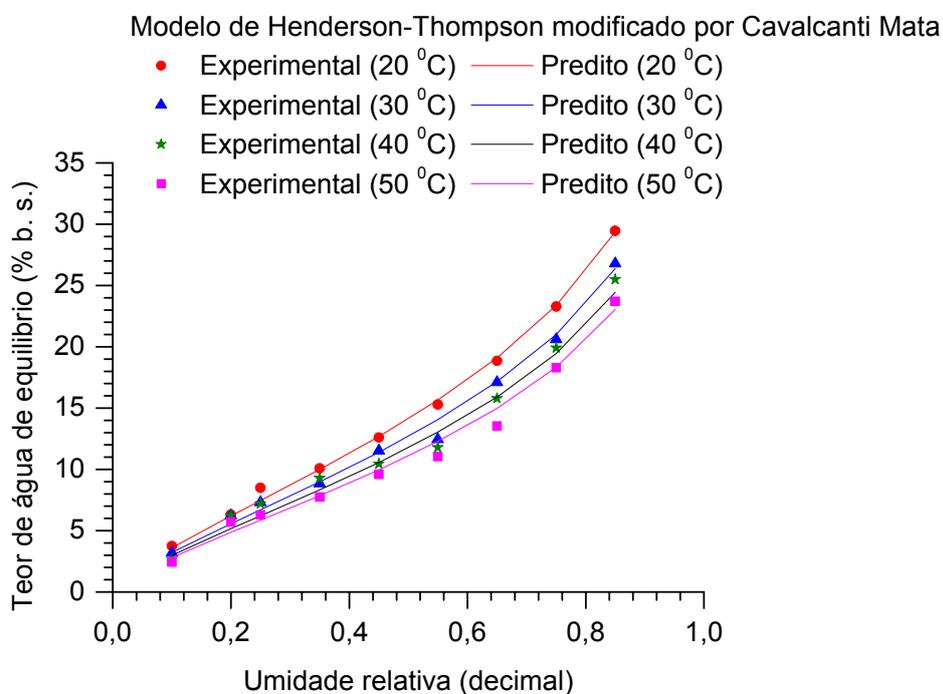


Figura 11 – Valores experimentais e preditos pelo modelo de Henderson-Thompson modificado por Cavalcanti Mata das isotermas de equilíbrio do feijão-macáçar.

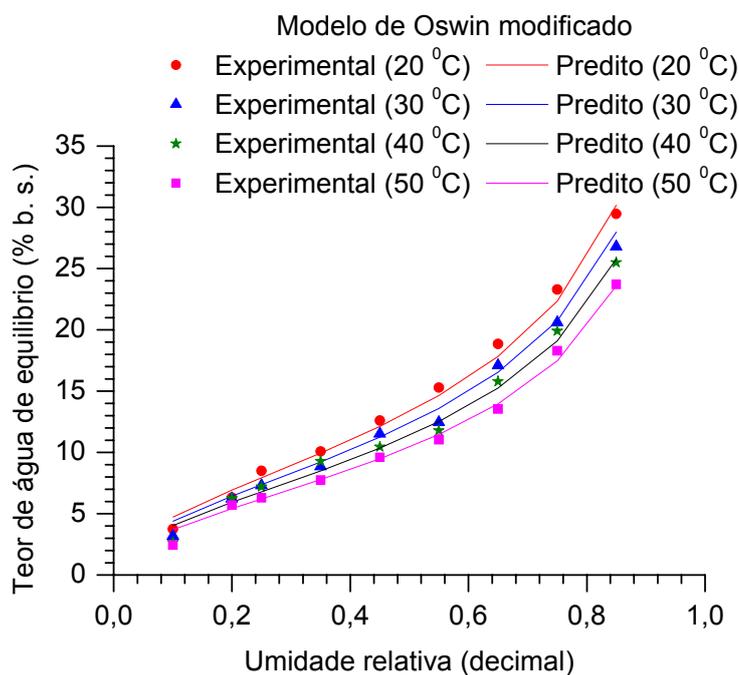


Figura 12 – Valores experimentais e preditos pelo modelo de Oswin modificado das isotermas de equilíbrio do feijão-macáçar.

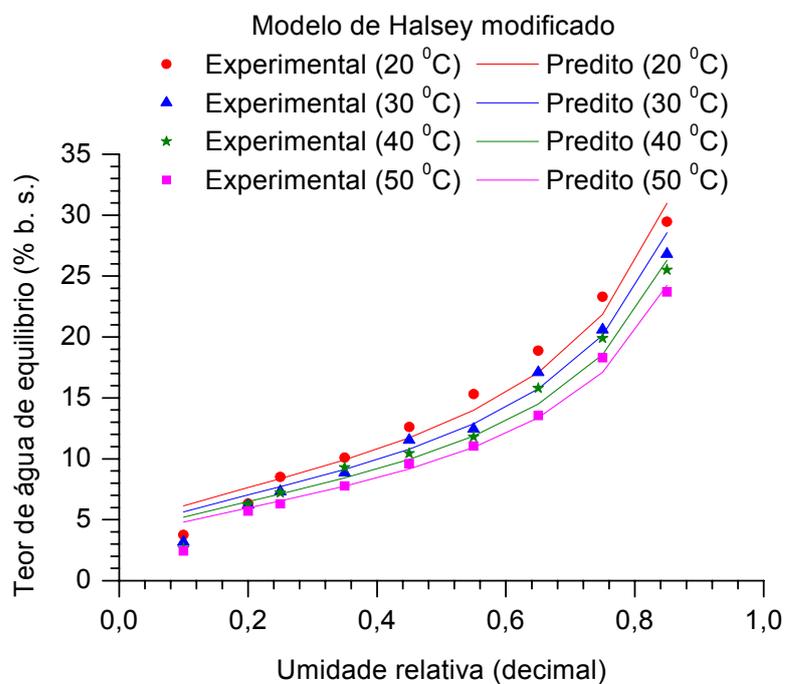


Figura 13 – Valores experimentais e preditos pelo modelo de Halsey modificado das isotermas de equilíbrio do feijão-macáçar.

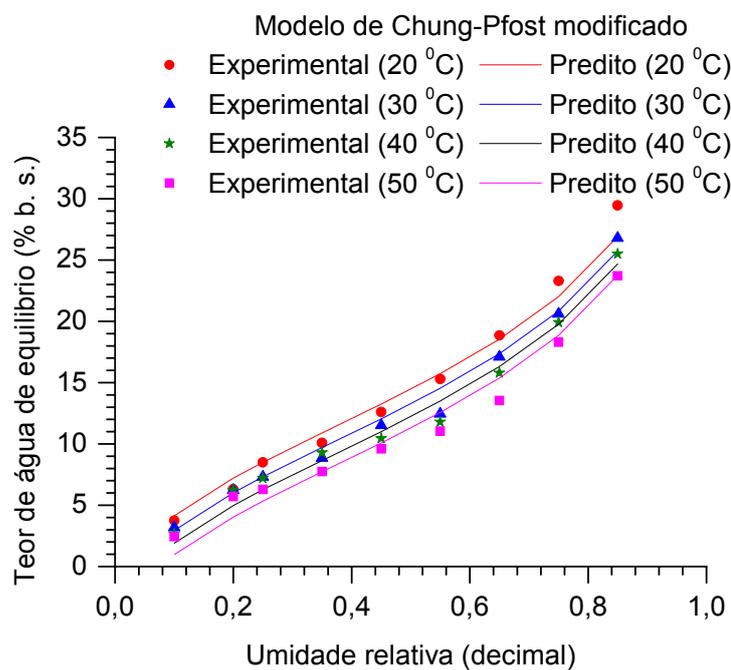


Figura 14 – Valores experimentais e preditos pelo modelo de Chung-Pfost modificado das isotermas de equilíbrio do feijão-macáçar.

4.1.3 – Calor latente de vaporização

Os valores das umidades relativas de equilíbrio contidos na Tabela 8 foram obtidos por meio da equação de Henderson-Thompson modificada por Cavalcanti Mata (Equação 37). Na Tabela 9 constam os valores da pressão de vapor saturado encontrados por meio da Equação 97 e os valores da pressão de vapor para cada temperatura estudada e seu respectivo teor de água de equilíbrio, determinados pela Equação 98.

Tabela 8 – Valores de umidade relativa de equilíbrio para o feijão-macáçar, em função do teor de água e da temperatura.

U _{eq} (% b.s.)	Temperatura (°C)						
	20	25	30	35	40	45	50
	Umidade relativa de equilíbrio (decimal)						
5,0	0,15276	0,16460	0,17488	0,18401	0,19226	0,19980	0,20676
10,0	0,34983	0,37315	0,39298	0,41027	0,42562	0,43945	0,45203
15,0	0,52875	0,55790	0,58205	0,60263	0,62054	0,63635	0,65049
20,0	0,67307	0,70266	0,72648	0,74625	0,76305	0,77758	0,79031
25,0	0,78131	0,80778	0,82840	0,84505	0,85883	0,87046	0,88044
30,0	0,85827	0,87993	0,89622	0,90898	0,91925	0,92770	0,93478
35,0	0,91070	0,92725	0,93926	0,94835	0,95546	0,96115	0,96579

Tabela 9 – Valores da pressão de vaporização da água do feijão-macáçar, em função do teor de água e da temperatura.

U _{eq} (% b.s.)	Temperatura (°C)						
	20	25	30	35	40	45	50
	P _v (Pa)						
5,0	353,83	516,45	734,81	1024,27	1403,15	1893,24	2520,10
10,0	810,24	1170,77	1651,22	2283,70	3106,32	4164,06	5509,47
15,0	1224,66	1750,41	2445,65	3354,44	4528,83	6029,84	7928,43
20,0	1558,92	2204,60	3052,49	4153,86	5568,93	7368,04	9632,53
25,0	1809,61	2534,39	3480,75	4703,78	6267,91	8248,17	10731,05
30,0	1987,86	2760,75	3765,73	5059,64	6708,88	8790,53	11393,33
35,0	2109,30	2909,25	3946,55	5278,81	6973,14	9107,47	11771,39
P _{vs} (Pa)	2316,11	3137,47	4201,75	5566,27	7298,20	9475,58	12188,25

Na Tabela 10 encontram-se os valores do logaritmo neperiano dos dados da pressão de vapor e pressão de vaporização da água contidos na Tabela 9. Para encontrar os valores dos coeficientes angulares das retas, de acordo com a metodologia de Othmer, foram traçados gráficos dos logaritmos neperianos da pressão de vapor em função da pressão de vaporização de saturação da água, conforme mostrado na Figura 15. Os valores dos coeficientes encontram-se na Tabela 11.

Tabela 10 – Valores neperiano da pressão de vaporização da água do feijão-macáçar, em função do teor de água e da temperatura estabelecidos.

U _{eq} (% b.s)	Temperatura (°C)						
	20	25	30	35	40	45	50
	ln P _v (Pa)						
5,0	5,8688	6,2470	6,5996	6,9317	7,2465	7,5460	7,8321
10,0	6,6973	7,0654	7,4093	7,7336	8,0412	8,3342	8,6142
15,0	7,1104	7,4676	7,8021	8,1180	8,4182	8,7045	8,9782
20,0	7,3517	7,6983	8,0237	8,3318	8,6250	8,9049	9,1729
25,0	7,5009	7,8377	8,1550	8,4561	8,7432	9,0177	9,2809
30,0	7,5948	7,9233	8,2337	8,5291	8,8112	9,0814	9,3408
35,0	7,6541	7,9756	8,2806	8,5715	8,8498	9,1169	9,3734
lnP _{vs} (Pa)	7,7476	8,0512	8,3433	8,6245	8,8954	9,1565	9,4082

Tabela 11 – Valores dos coeficientes das retas para determinação do calor latente de vaporização do feijão-macáçar.

Temperatura (°C)	a	b	R ²
20	-2,01542	1,1750	0,99
25	-1,16475	1,1474	0,99
30	-0,7284	1,1181	0,99
35	-0,46526	1,0904	0,99
40	-0,29722	1,0660	0,99
45	-0,18795	1,0458	0,99
50	-0,11697	1,0300	0,99

Na Tabela 12 encontram-se os valores do calor latente de vaporização da água e os valores do calor latente de vaporização da água do feijão-macáçar obtidos por meio das Equações 99 e 100, respectivamente.

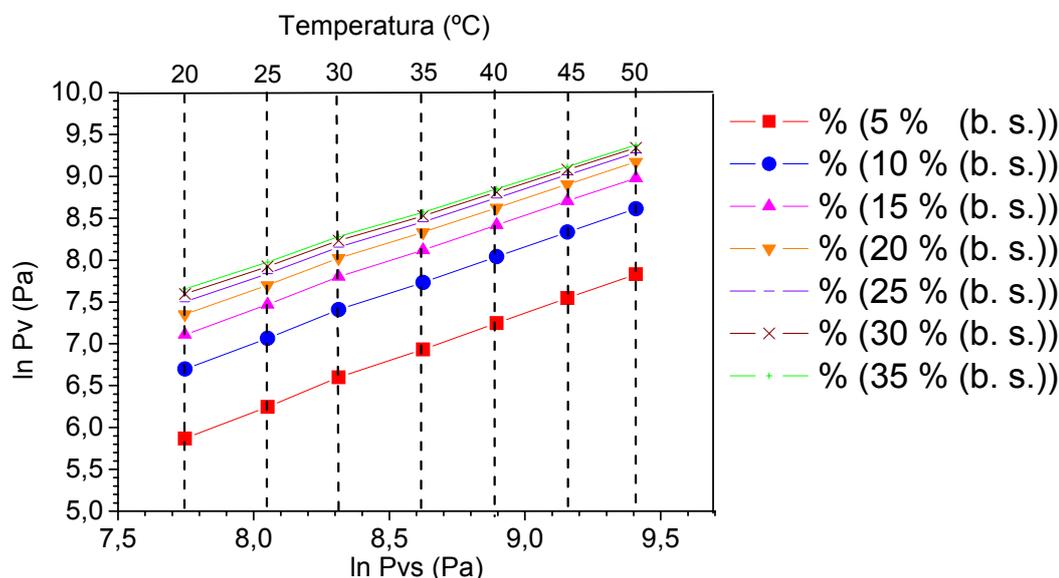


Figura 15 - Relação entre $\ln(P_v)$ e $\ln(P_{vs})$ para o feijão-macáçar com teor médio de água de equilíbrio variando de 5 a 35 %, base seca.

Tabela 12 – Calor latente de vaporização da água do feijão-macáçar em função do teor de água e da temperatura estabelecidos.

		Temperatura (°C)							
U_{eq} (% b.s.)	20	25	30	35	40	45	50	*b	
$H_{fg}^* = h_{fg} \times b^*$ (kPa)									
5,0	2885,22	2871,21	2857,19	2843,17	2829,15	2815,13	2801,12	1,1750	
10,0	2817,45	2803,76	2790,07	2776,39	2762,70	2749,01	2735,32	1,1474	
15,0	2745,50	2732,17	2718,83	2705,49	2692,15	2678,81	2665,47	1,1181	
20,0	2677,49	2664,48	2651,47	2638,46	2625,45	2612,45	2599,44	1,0904	
25,0	2617,57	2604,85	2592,14	2579,42	2566,70	2553,98	2541,27	1,0660	
30,0	2567,97	2555,49	2543,02	2530,54	2518,07	2505,59	2493,11	1,0458	
35,0	2529,17	2516,89	2504,60	2492,31	2480,02	2467,73	2455,45	1,0300	
h_{fg} (kPa)	2455,51	2443,58	2431,65	2419,72	2407,79	2395,86	2383,93		

*b é a inclinação da reta.

Fixando-se uma determinada temperatura, observa-se o efeito do teor de água sobre o valor do calor latente de vaporização do produto, ou seja, o calor latente de vaporização decresce com o aumento do teor de água de equilíbrio. Em relação à temperatura, também ocorre o mesmo fenômeno, conforme dados existente na Tabela 12. Os valores encontrados para o calor latente de vaporização mostram que, durante o processo de secagem, o consumo de energia aumenta à medida que o conteúdo de água do produto diminui. Por outro lado, à proporção que o calor latente de vaporização da água do produto se aproxima do calor latente de vaporização da água, o processo de secagem consome menos energia e obtêm-se altas taxas de secagem. Isso ocorre em virtude da grande quantidade de *água livre existente no produto. Este fato foi vivenciado durante a execução deste trabalho, já que se trabalhou com um produto que continha um valor inicial médio de 65 % de água, base úmida. Nestas condições e trabalhando-se com temperatura ambiente média de 30 °C, o produto perde água na temperatura ambiente, cerca de 10 % do peso diariamente.

Na Figura 16 encontra-se o gráfico dos valores preditos e os valores provenientes dos dados experimentais de teor de água de equilíbrio do calor latente de vaporização do feijão-macáçar.

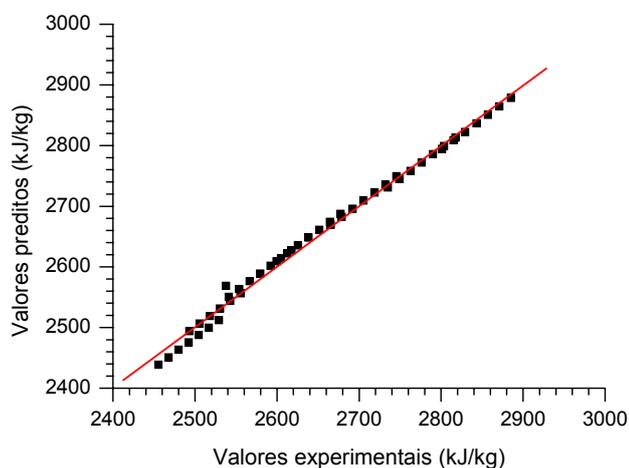


Figura 16 – Gráfico de correspondência entre os valores experimentais e os estimados para o calor latente de vaporização do feijão-macáçar.

* Neste trabalho, entenda-se água livre como sendo a água que está ligada por meio das forças físicas (forças de Van der Waals), que ocorrem entre moléculas de água, caracterizando-se como forças fracas por não estarem ligadas às cadeias carbônicas, conforme definição de FIOREZE, 2004.

4.1.4 - Calor específico

Os dados contidos na Tabela 13 mostram que o calor específico do feijão-macáçar aumenta linearmente com o seu teor de água. De acordo com MORAES (1991), CAVALCANTI MATA (1993), TAIWO *et al.* (1996) e BORÉM *et al.* (2002), que estudaram o feijão-carioquinha, o milho branco, o feijão-macáçar e o café, respectivamente, esse é o comportamento normal dos grãos. Os valores experimentais e os valores estimados, bem como a equação de ajuste, encontram-se na Figura 17.

Tabela 13 – Calor específico do feijão-macáçar em função do teor de água.

Teor médio de água (% base úmida)	Calor específico (J/kg °C)
5	1396,68
10	1469,11
20	1720,73
40	2077,85
65	2637,61

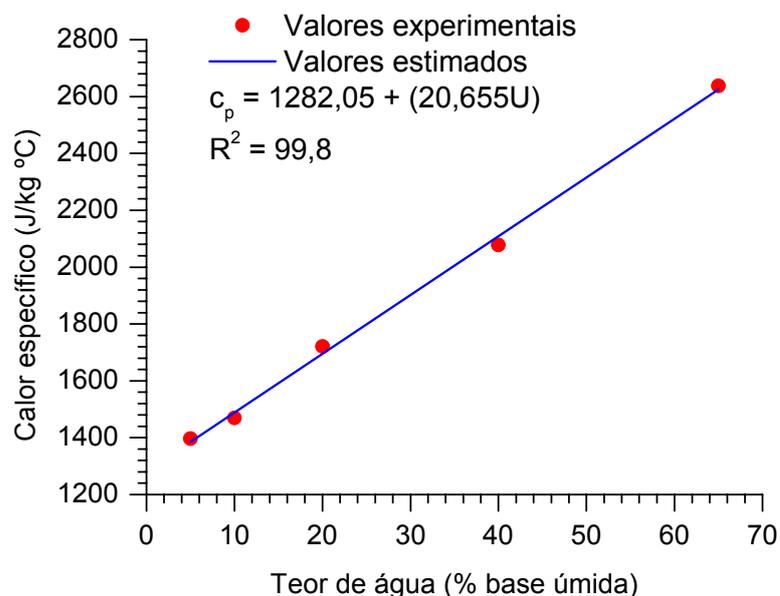


Figura 17 – Valores experimentais e estimados do calor específico do feijão-macáçar em função do teor de água.

4.2 - Equação de secagem em camada fina

Os valores contidos na Tabela 14 foram obtidos a partir da matriz de planejamento experimental criada para avaliar os efeitos da temperatura, do teor de água inicial e da velocidade do ar de secagem, sobre os parâmetros da equação de camada fina de Page e sobre a taxa de secagem do produto estudado. Os dados experimentais encontram-se nos ANEXOS 9 e 10.

Tabela 14 – Valores dos parâmetros da equação de Page obtidos por meio de regressão não linear, em função das temperaturas, dos teores de água e das velocidades do ar de secagem.

Experi- mento	Condições de secagem			Parâmetros			
	T (°C)	U _i (% b.u.)	v (m/s)	K	N	R ²	*t _{sec} (min)
1	40	20	0,2	0,019510	0,732220	99,61	1120
2	70	20	0,2	0,050295	0,602943	99,52	950
3	40	65	0,2	0,007905	0,983391	99,84	870
4	70	65	0,2	0,031495	0,892133	99,98	570
5	40	20	0,8	0,020252	0,707343	99,81	1120
6	70	20	0,8	0,054810	0,606733	99,60	830
7	40	65	0,8	0,035036	0,762111	99,98	810
8	70	65	0,8	0,062461	0,794882	99,91	570
9	55	40	0,5	0,049204	0,671681	99,73	960
10	55	40	0,5	0,062890	0,622340	99,80	960
11	55	40	0,5	0,067611	0,623521	99,91	960

*t_{sec} - tempo de duração da secagem

4.2.1 - Efeitos das variáveis sobre o valor de 'K'

Nos resultados experimentais correspondentes aos experimentos 1 e 2 da Tabela 14 têm-se como valores fixos a velocidade do ar e o teor de água inicial, portanto, pode-se afirmar que a variação ocorrida no valor da temperatura de um experimento em relação ao outro, acarretou um aumento no valor de 'K'. De forma semelhante aconteceu nos experimentos 3, 4, 5, 6, 7 e 8, ou seja, a temperatura tem efeito significativo sobre o parâmetro 'K'. Em menor proporção, a variável velocidade também exerce influência sobre o valor de 'K', basta comparar os experimentos: 1 com 5, 2 com 6, 3 com 7 e 4 com 8. No gráfico de Pareto (Figura 18) encontram-se

quantificados os efeitos das três variáveis estudadas sobre o valor de ‘K’, bem como as suas interações. Verifica-se que o efeito temperatura (T) é significativo, os efeitos da velocidade (v), do teor de água inicial (U_i) e da interação entre as variáveis não são significativos. O nível de significância (p) utilizado nas análises estatísticas foi de 5 %.

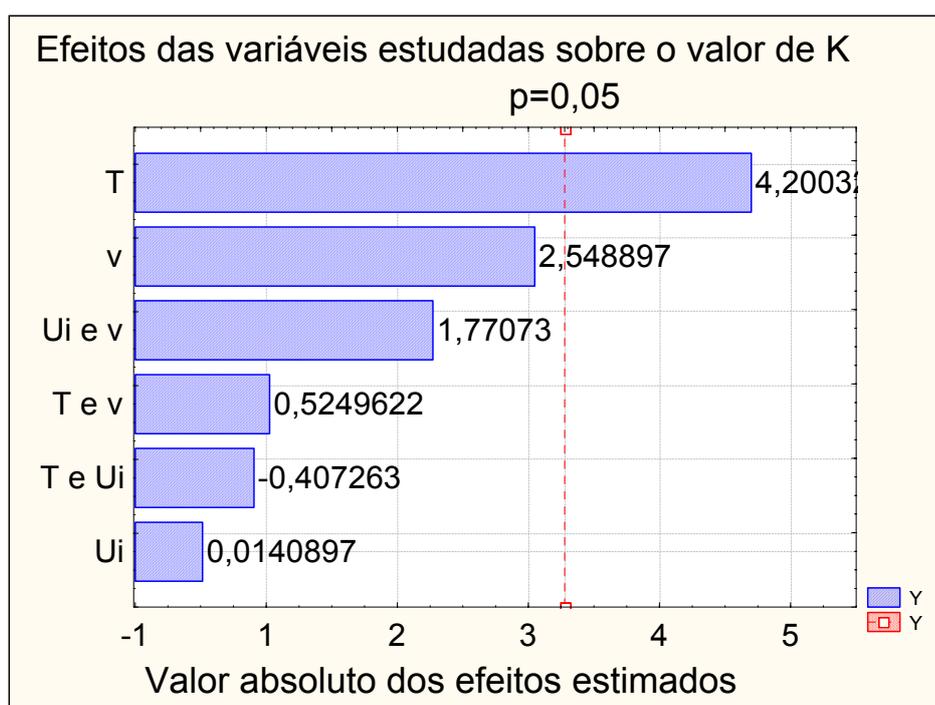


Figura 18 – Influência da temperatura, do teor de água inicial e da velocidade do ar de secagem sobre o valor de ‘K’.

4.2.2 - Efeitos das variáveis sobre o valor de ‘N’

Observa-se nos experimentos 1 e 3 que o aumento no teor de água inicial do segundo em relação ao primeiro, ocasionou um aumento no valor de ‘N’. De forma análoga, ocorreu nos experimentos 2 e 4, 5 e 7, 6 e 8. No gráfico de Pareto (Figura 19) estão quantificados os efeitos das variáveis estudadas sobre o valor de ‘N’, cuja dependência principal ocorre em relação ao teor de água inicial (U_i). Já as interações entre as variáveis não têm valor significativo sobre o comportamento de ‘N’. O nível de significância (p) utilizado nas análises estatísticas foi de 5 %. Os efeitos da velocidade do ar (v), da temperatura (T) e do teor de água inicial (U_i) sobre as duas constantes, ‘N’ e ‘K’, também foram observados por MISRA e BROOKER (1980) durante a secagem de milho em camada fina.

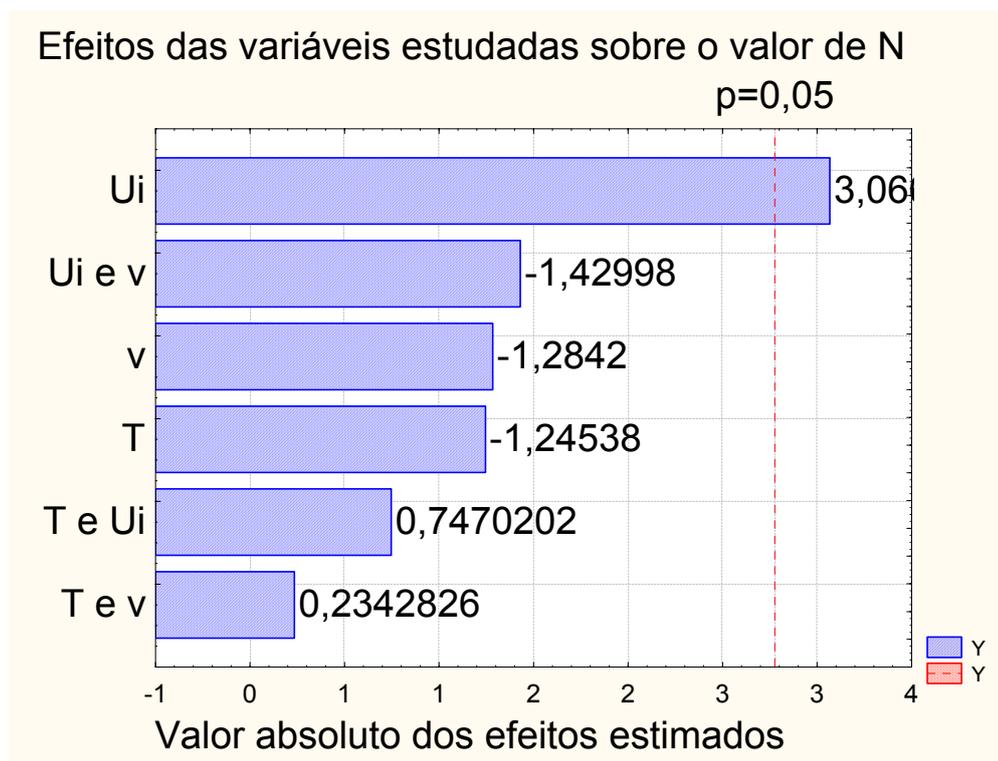


Figura 19 – Influência da temperatura, do teor de água inicial e da velocidade do ar de secagem sobre o valor de ‘N’.

4.2.3 - Efeitos da velocidade do ar sobre a secagem em camada fina do feijão-macáçar

Analisando-se as curvas de secagem contidas na Figura 20 observa-se que não há diferença significativa entre a secagem obtida à velocidade de 0,2 m/s (experimento 1) e à obtida a 0,8 m/s (experimento 5), conforme consta na Tabela 14. As curvas de secagem mostradas na Figura 21 (experimentos 2 e 6) apresentam comportamento semelhante às curvas da Figura 20, porém, verifica-se uma redução no tempo total de secagem do experimento 6. Nesse caso, pode-se afirmar que a redução no tempo de secagem do experimento 6 foi causado, não só pelo aumento da velocidade mas, também, pelo efeito da temperatura. Para as condições dadas, pode-se afirmar que o aumento isolado da velocidade do ar não foi suficiente para diminuir o tempo de secagem. HUTCHINSON e OTTEN (1983) obtiveram resultados idênticos durante a secagem em camada fina de soja e de feijão branco. MARTINS (1988) também observou esse comportamento para as variedades de milho híbrido.

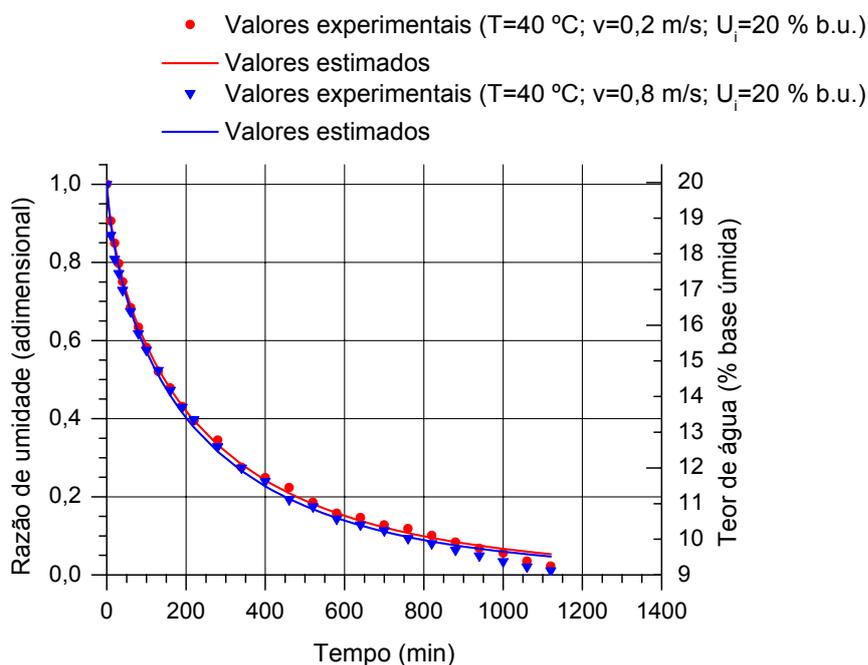


Figura 20 – Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 20 %, base úmida, obtidas à temperatura de 40 °C.

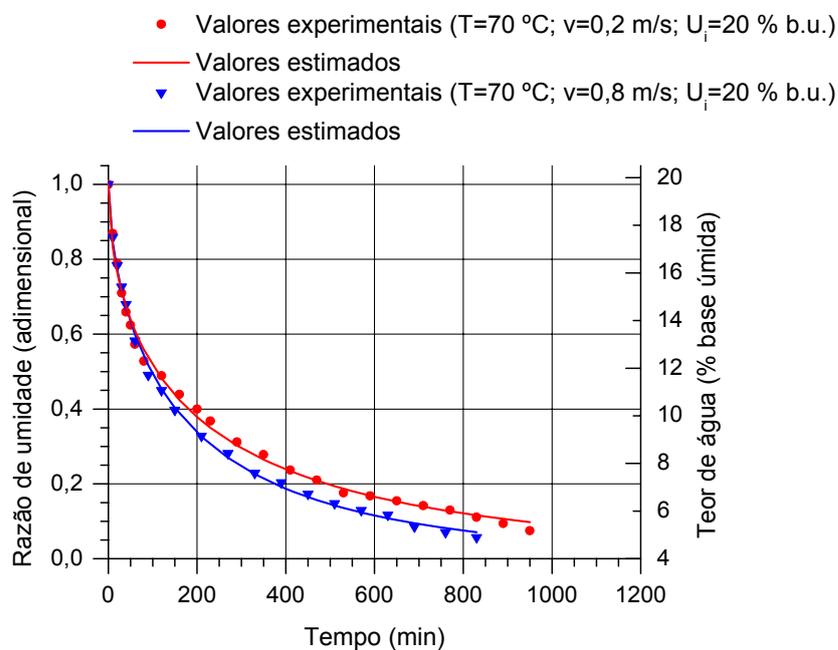


Figura 21 – Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com e teor médio de água inicial de 20 %, base úmida, obtidas à temperatura de 70 °C.

As curvas de secagem mostradas nas Figuras 22 e 23 (experimentos 3, 7, 4 e 8, respectivamente) foram obtidas a partir da secagem do produto com teor médio de água inicial de 65 %, base úmida. Na Figura 22 observa-se que o experimento feito à velocidade de 0,8 m/s apresentou uma taxa de secagem maior que o experimento feito à velocidade de 0,2 m/s, ou seja, o aumento isolado da velocidade do ar teve efeito sobre a taxa de secagem. Nesse caso, como a quantidade de água livre contida no produto é muito alta, quando se aumenta a velocidade do ar sua capacidade de mover a água livre também é intensificada, fato que não ocorre quando o produto possui menor teor de água.

LI e MOREY (1984) utilizaram o modelo de PAGE para estudar os efeitos da temperatura do ar de secagem, do fluxo de ar, do teor de água inicial e da umidade relativa do ar, durante a secagem de milho. Foi constatado que a temperatura do ar de secagem e o teor de água inicial têm efeitos significativos sobre as constantes de secagem. As outras duas variáveis exerceram pouca influência no processo.

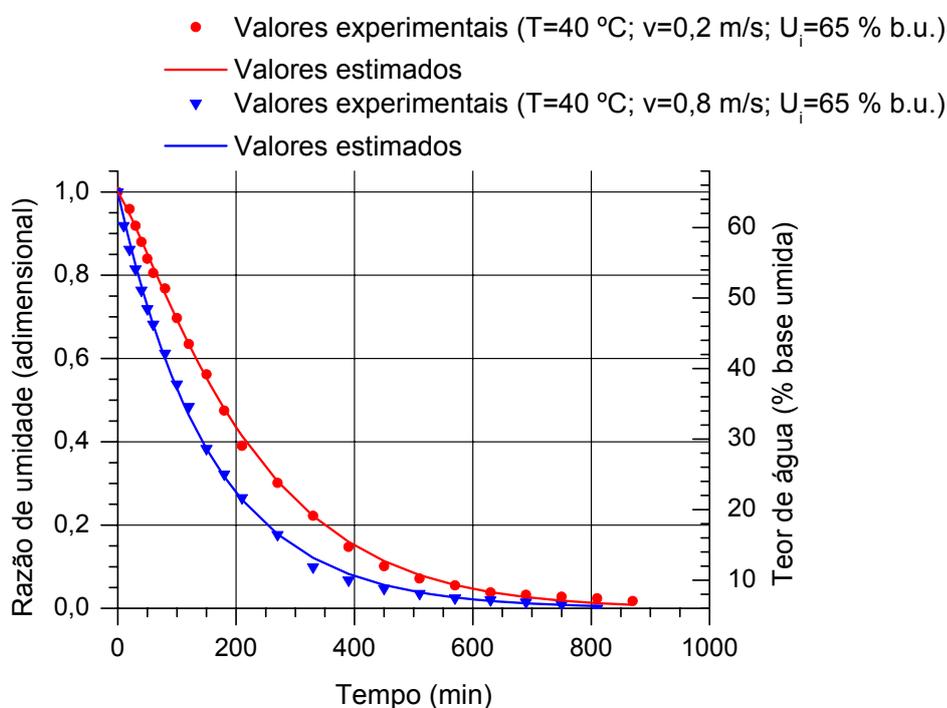


Figura 22 – Curvas de secagem em camada fina do feijão-macacão com e teor médio de água inicial de 65 %, base úmida, obtidas à temperatura de 40 °C.

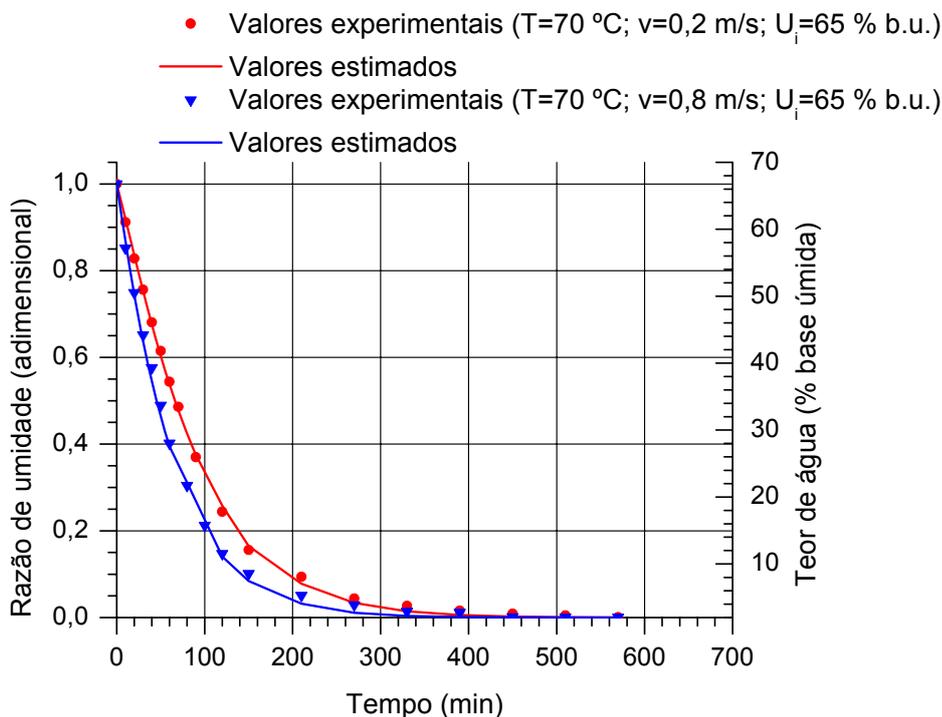


Figura 23 – Curvas de secagem em camada fina do feijão-macacão com e teor médio de água inicial de 65 %, base úmida, obtidas à temperatura de 70 °C.

4.2.4 - Efeitos do teor de água inicial sobre a secagem do feijão-macacão

Nas Figuras 24 a 25 encontram-se, respectivamente, as curvas de secagem em camada fina do produto com teor médio de água inicial de 20 % e 65 %, base úmida, obtidas com temperatura do ar de secagem a 40 °C. Nas citadas Figuras observa-se: que o produto com teor de água inicial de 20 % necessitou de 1120 minutos para atingir a umidade de equilíbrio, enquanto que o produto com teor de água inicial de 65 % só precisou de 870 minutos; que tomando-se um determinado tempo, por exemplo, 400 minutos, constata-se que o produto com teor médio de água inicial de 20 % perdeu, aproximadamente, 8 % de água, já o produto com 65 % perdeu cerca de 49 % de água. O menor tempo de secagem do produto com 65 % de água é função de uma maior taxa de secagem, que por sua vez, é consequência da grande quantidade de água contida no produto.

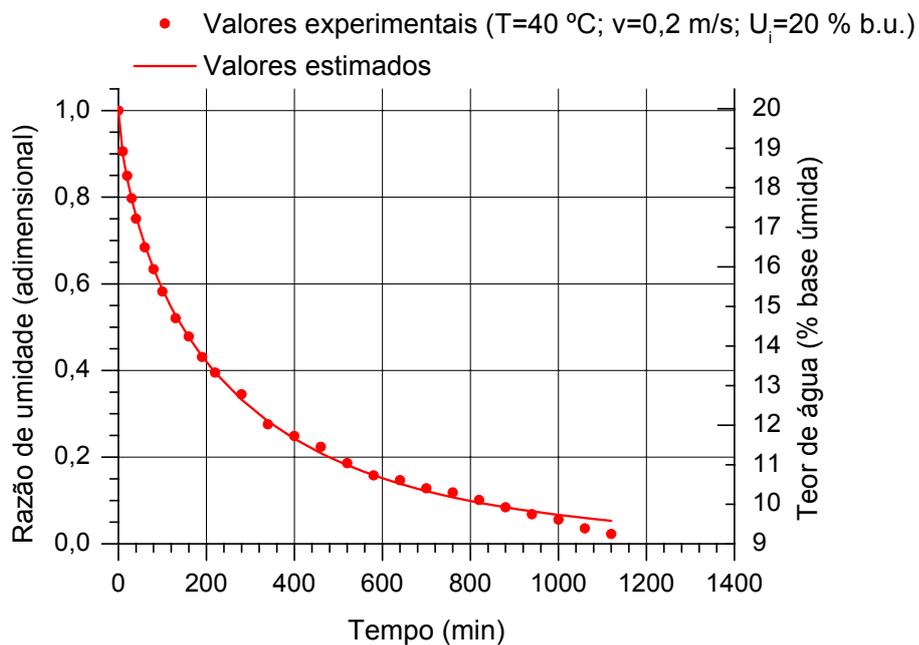


Figura 24 – Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com e teor médio de água inicial de 20 %, base úmida, obtidas à temperatura de 40 °C.

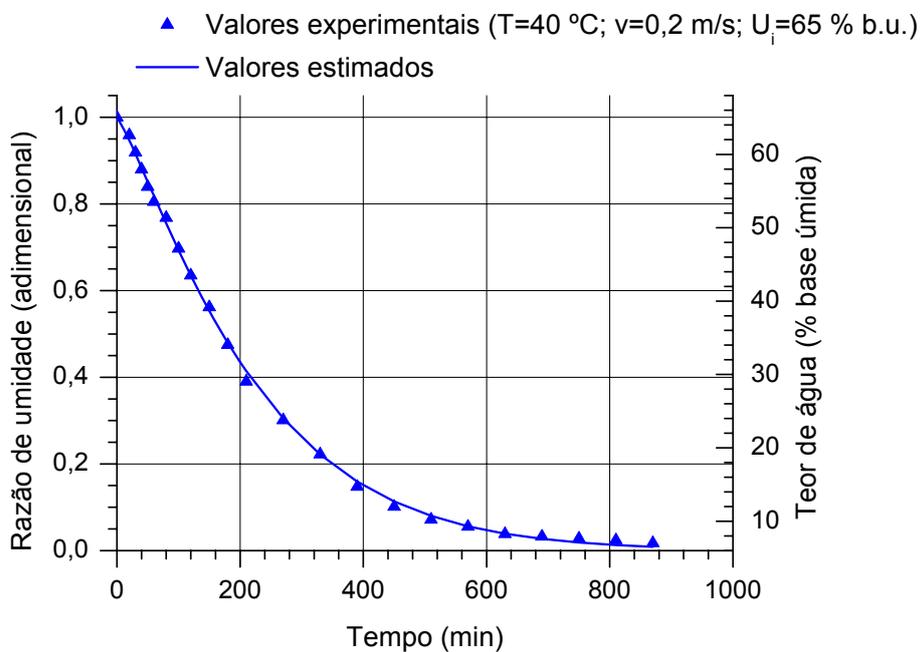


Figura 25 – Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com e teor médio de água inicial de 65 %, base úmida, obtidas à temperatura de 40 °C.

As curvas de secagem das Figuras 26 e 27 foram obtidas a mesma temperatura que as curvas das Figuras 24 e 25, porém, com velocidade do ar de secagem de 0,8 m/s. Para o produto com teor médio de água inicial de 20 % o aumento na velocidade do ar de secagem não causou alteração no comportamento da secagem, ou seja, o tempo necessário para que o produto atingisse a umidade de equilíbrio não foi alterado, conforme dados contidos na Tabela 14. Para o produto com teor médio de água inicial de 65 % houve redução no tempo de secagem, aproximadamente, 6,9 %. A influência da velocidade do ar sobre a taxa de secagem do produto com teores de água distintos já foi discutido no item 4.2.3.

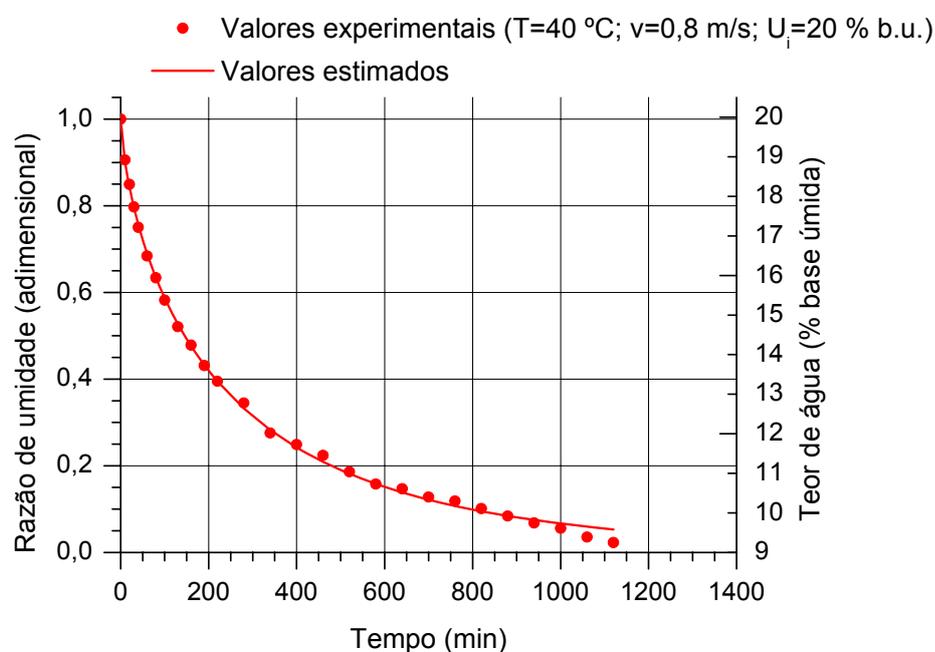


Figura 26 – Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com e teor médio de água inicial de 20 %, base úmida, obtidas à temperatura de 40 °C.

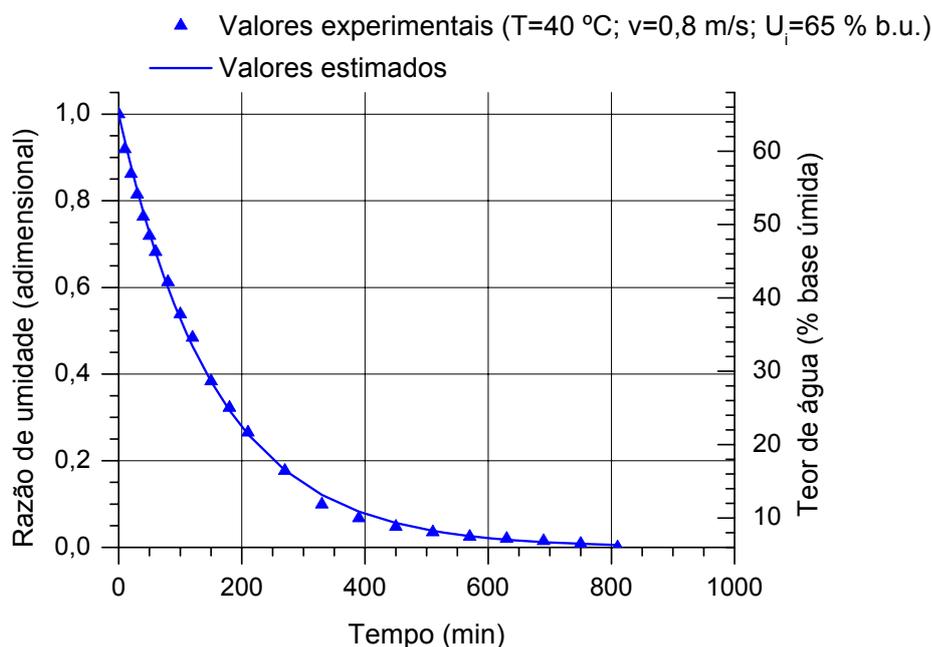


Figura 27 – Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com e teor médio de água inicial de 65 %, base úmida, obtidas à temperatura de 40 °C.

Nas Figuras 28 a 31 encontram-se as curvas de secagem em camada fina do produto com teor médio de água inicial de 20 % e 65 %, base úmida. As curvas das Figuras 28 e 29 foram obtidas com temperatura do ar de secagem a 70 °C e velocidade do ar de secagem de 0,2 m/s. Comparando-se com os resultados obtidos a temperatura de 40 °C (Figuras 24 e 25), verifica-se que há uma semelhança no comportamento da secagem para as duas temperaturas estudadas, nos dois casos, o produto com teor de água inicial de 20 % necessita de mais tempo para atingir o equilíbrio (950 minutos), enquanto que o produto com teor médio de água inicial de 65 % necessita de 570 minutos. No caso das curvas das Figuras 30 e 31, em função do aumento da temperatura, o produto demorou menos tempo para atingir o equilíbrio, todavia, quando comparadas com as Figuras 26 e 27, observa-se que o comportamento da secagem foi idêntico aos das Figuras 29 e 30, ou seja, o produto com menor teor de água demorou mais tempo para atingir o equilíbrio. Portanto, para as condições em que foram feitos os experimentos, o produto com teor de água muito alto apresentou maior taxa de secagem em função da quantidade de água livre contida no grão.

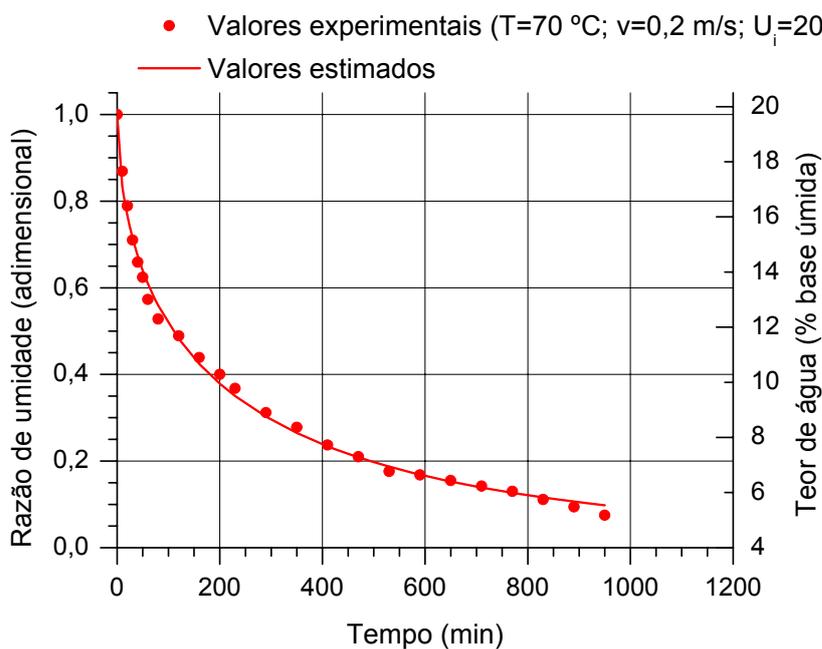


Figura 28 – Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com e teor médio de água inicial de 20 %, base úmida, obtidas à temperatura de 70 °C.

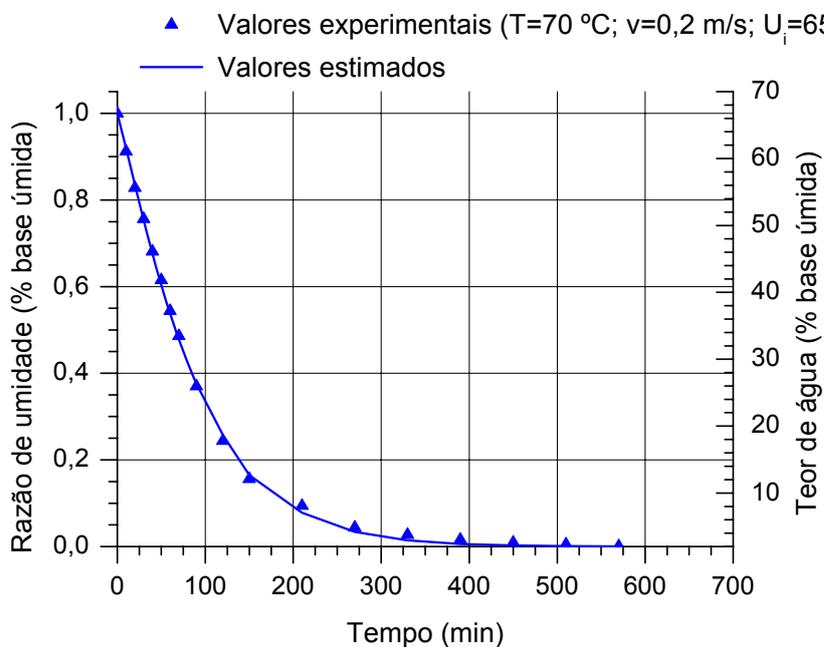


Figura 29 – Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com e teor médio de água inicial de 65 %, base úmida, obtidas à temperatura de 70 °C.

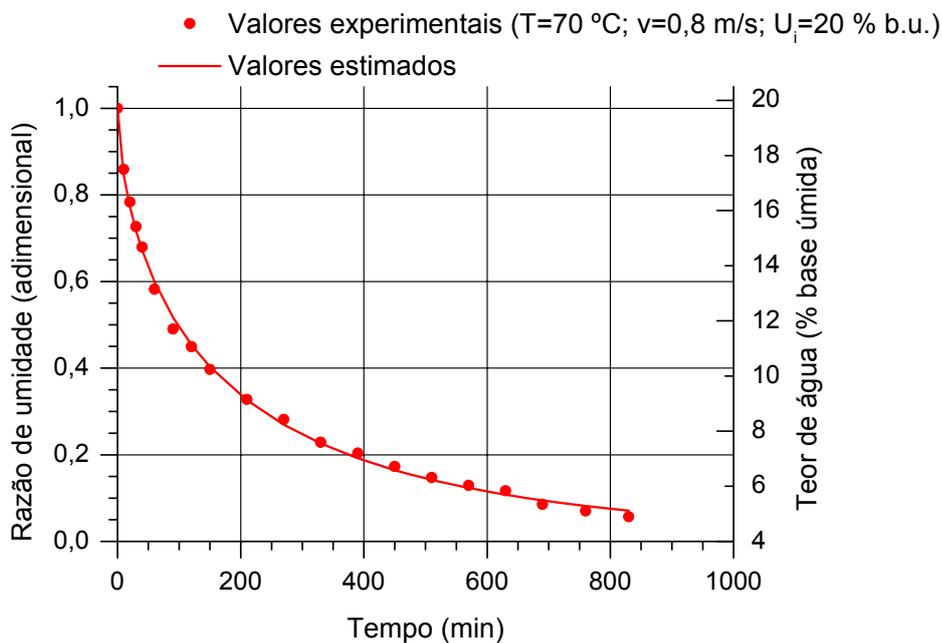


Figura 30 – Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com e teor médio de água inicial de 20 %, base úmida, obtidas à temperatura de 70 °C.

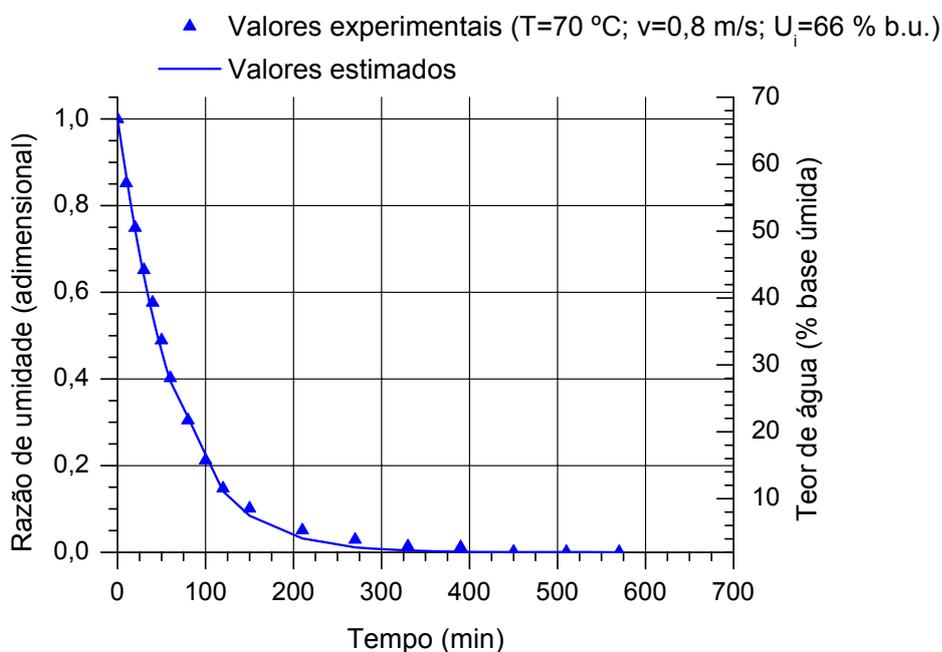


Figura 31 – Curvas de secagem em camada fina do feijão-macáçar com e teor médio de água inicial de 65 %, base úmida, obtidas à temperatura de 70 °C.

Os valores contidos na Figura 32 ratificam as observações feitas a respeito dos efeitos do teor de água inicial sobre a taxa de secagem em camada fina do feijão-macáçar. Verifica-se, também, que o valor dos efeitos combinados das variáveis estudadas é inferior ao valor do efeito isolado tanto do teor de água do produto como da temperatura de secagem, portanto, os efeitos das variáveis não têm poder cumulativo.

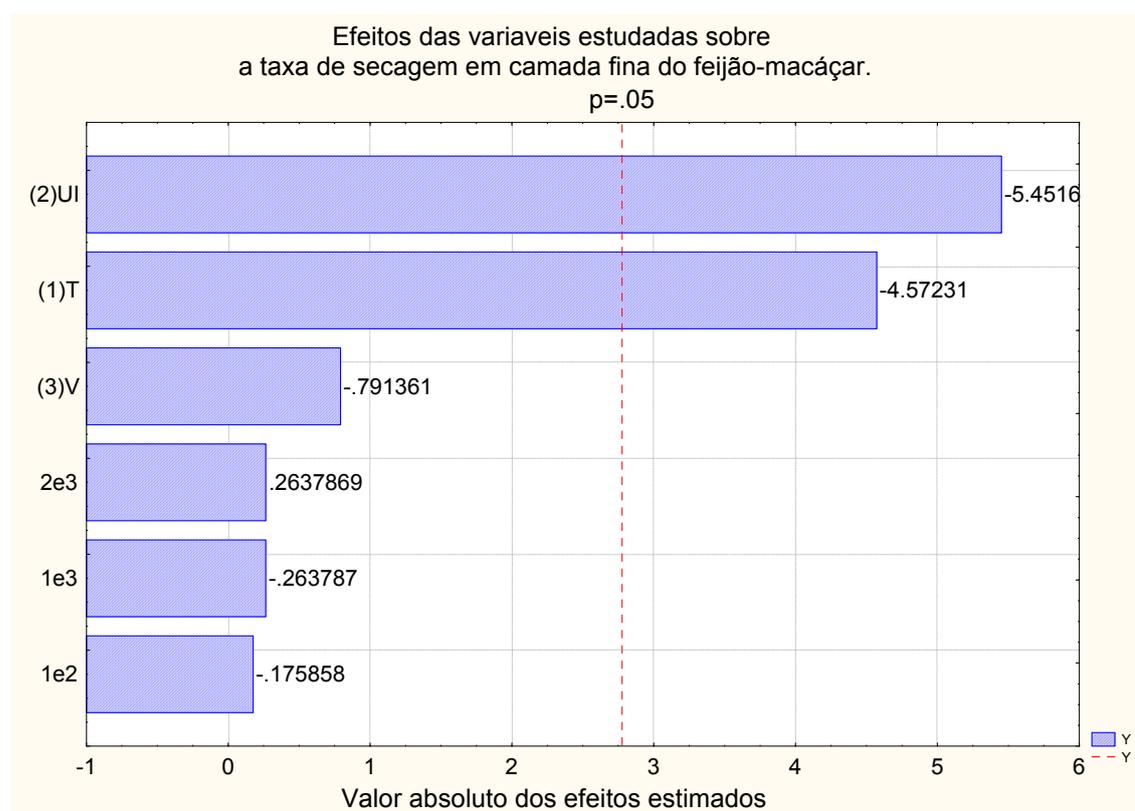


Figura 32 – Efeitos do teor de água inicial sobre a taxa de secagem do feijão-macáçar.

Utilizou-se análise de regressão não linear para obter expressões matemáticas para as constantes ‘K’ e ‘N’ em função da temperatura do ar de secagem e do teor de água do produto. Dessa forma, para o produto com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, K e N foram expressos como:

a) modelo de Michigan;

$$K = -1,007 \times 10^{-4} + (1,249 \times 10^{-5} \times T) - (9,5 \times 10^{-8} \times T^2) \quad (128)$$

$$N = 0,91058 - (0,00185 \times T) + (6,645 \times 10^{-6} \times T^2) \quad (129)$$

b) modelo de Thompson;

$$K = 0,00823 - (3,7601 \times 10^{-4} \times T) + (4,65 \times 10^{-6} \times T^2) \quad (130)$$

$$N = 1,8185 - (0,01238 \times T) + (6,645 \times 10^{-6} \times T^2) \quad (131)$$

A expressão para N proporcionou ajustes com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,98 %. A expressão para K o coeficiente de determinação foi de 0,99 %.

Para o produto com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida, K e N foram expressos da seguinte forma:

a) modelo de Michigan;

$$K = 5,28 \times 10^{-4} - (1,53 \times 10^{-5} \times T) + (2,1 \times 10^{-7} \times T^2) \quad (132)$$

$$N = -1,36088 + (0,12606 \times T) - (0,0023 \times 10^{-6} \times T^2) + (1,36558 \times 10^{-5} \times T^3) \quad (133)$$

b) modelo de Thompson;

$$N = -1,36088 + (0,12606 \times T) - (0,0023 \times T^2) + (1,36558 \times 10^{-5} \times T^3) \quad (134)$$

$$K = 0,00872 - (3,2344 \times 10^{-4} \times T) + (4,27 \times 10^{-6} \times T^2) \quad (135)$$

A expressão para N proporcionou ajustes com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,95 %. A expressão para K o coeficiente de determinação foi de 0,98 %.

Para o produto com teor médio de água inicial de 64 %, base úmida, K e N foram expressos por meio da seguinte forma:

a) modelo de Michigan para temperatura de 50 e 60 °C;

$$N = -4,5163 + (0,28735 \times T) - (0,00491 \times T^2) + (2,83 \times 10^{-5} \times T^3) \quad (136)$$

$$K = 0,0017795 - (9,04 \times 10^{-5} \times T) + (1,525 \times 10^{-6} \times T^2) - (8,5 \times 10^{-9} \times T^3) \quad (137)$$

b) modelo de Michigan para temperatura de 70 °C;

$$N = 8,0 \times 10^{-6} + (8,16667 \times 10^{-7} \times T) - (3,5 \times 10^{-8} \times T^2) + (3,33 \times 10^{-10} \times T^3) \quad (138)$$

$$K = -5,24137 + (0,32507 \times T) - (0,00523 \times T^2) + (2,73483 \times 10^{-5} \times T^3) \quad (139)$$

c) modelo de Thompson para temperatura de 50 °C;

$$K = -0,0022 + (5,15 \times 10^{-5} \times T) \quad (140)$$

$$N = 2,0329 - (0,01644 \times T) \quad (141)$$

d) modelo de Thompson para temperatura de 60 °C;

$$K = -0,0004529 + (1,832 \times 10^{-5} \times T) \quad (142)$$

$$N = 5,6716 - (0,2685 \times T) + (0,00525 \times T^2) - (3,3216 \times 10^{-5} \times T^3) \quad (143)$$

e) modelo de Thompson para temperatura de 70 °C;

$$K = 0,0008329 - (2,431 \times 10^{-5} \times T) + (3,75 \times 10^{-7} \times T^2) \quad (144)$$

$$N = 1,47351 - (0,0116 \times T) + (1,2869 \times 10^{-4} \times T^2) \quad (145)$$

A expressão para N proporcionou ajustes com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,99 %. A expressão para K o coeficiente de determinação foi de 0,98 %.

Os valores dos coeficientes do modelo de Michigan foram encontrados com o tempo de secagem sendo expresso em segundo, os do modelo de Thompson a unidade de tempo foi o minuto.

4.6 – Resultados experimentais e estimados da cinética de secagem em camada espessa do feijão-macáçar.

4.6.1 – Curvas de secagem do produto com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida.

Os dados experimentais da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, e os estimados pelos modelos de Michigan e de Thompson encontram-se nos ANEXOS de 11 a 16. As Figuras 33 a 44 contêm as curvas de secagem em camada espessa obtidas experimentalmente para cada camada, e as obtidas por simulação utilizando os modelos citados, para as temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

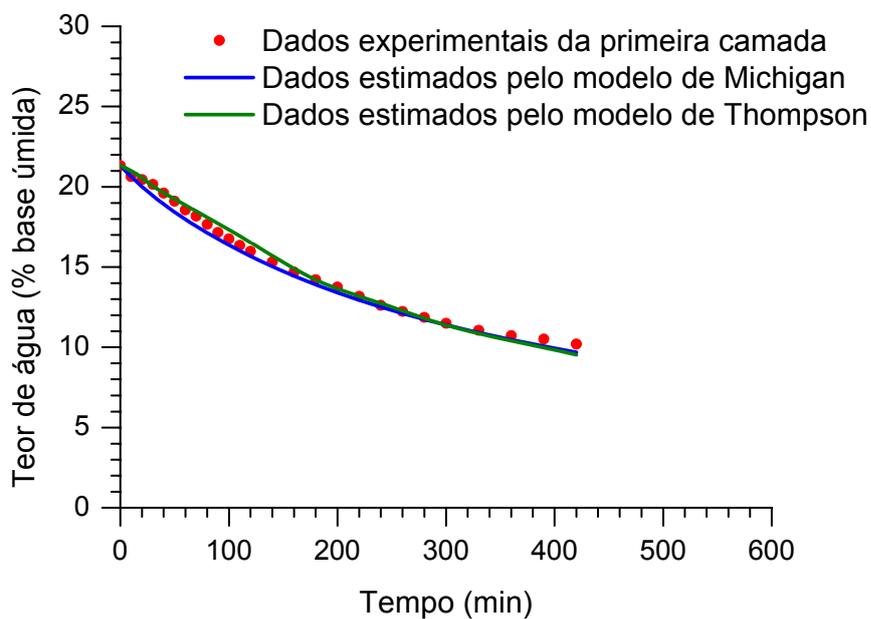


Figura 33 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, temperatura de 50 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.

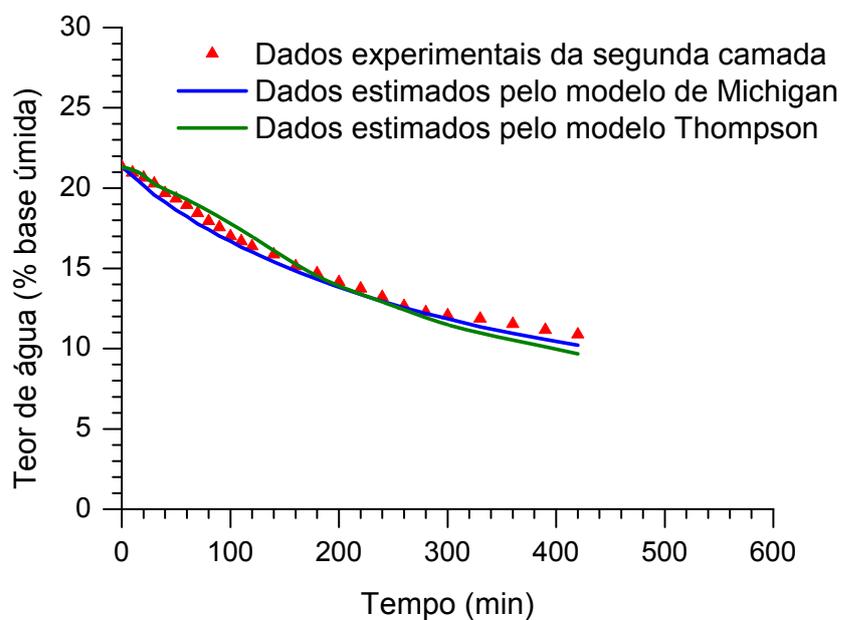


Figura 34 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida.

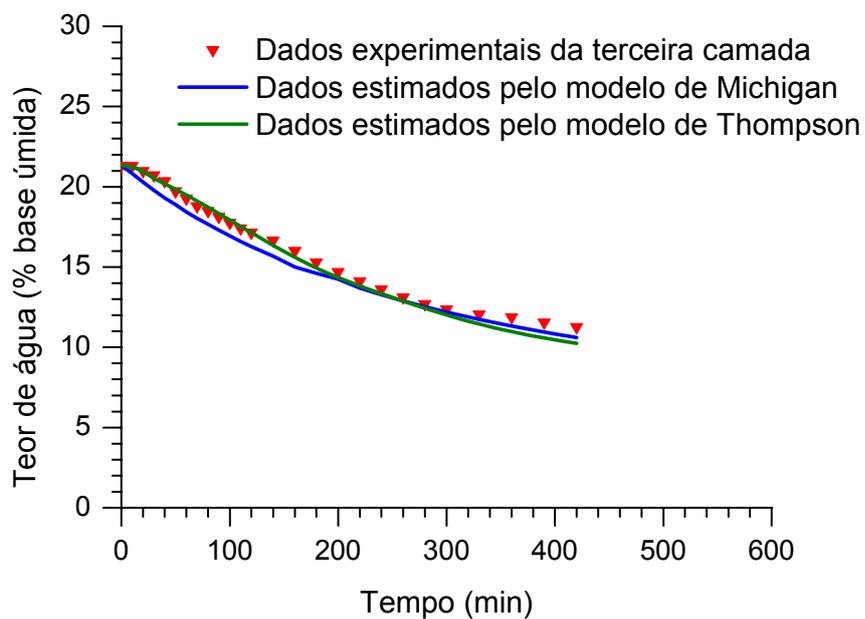


Figura 35 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida.

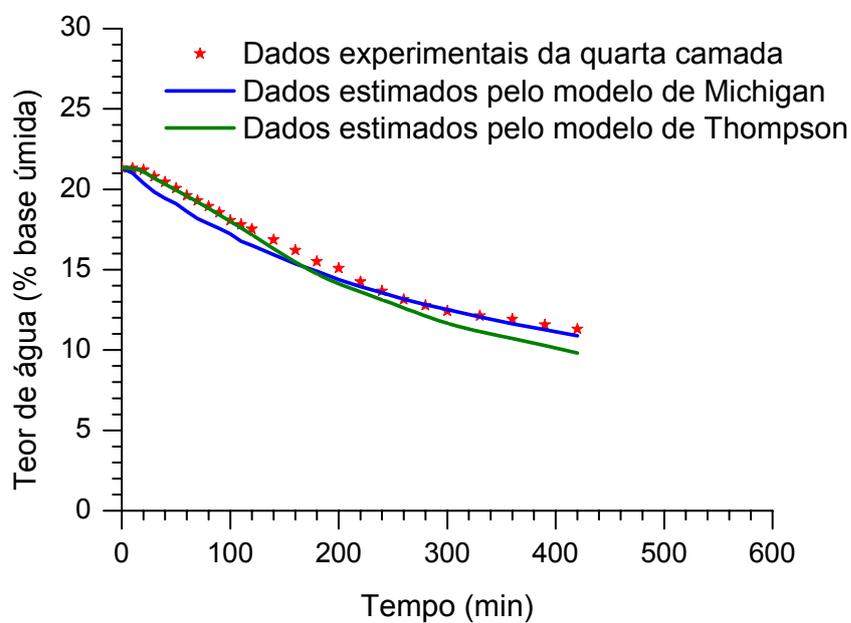


Figura 36 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida.

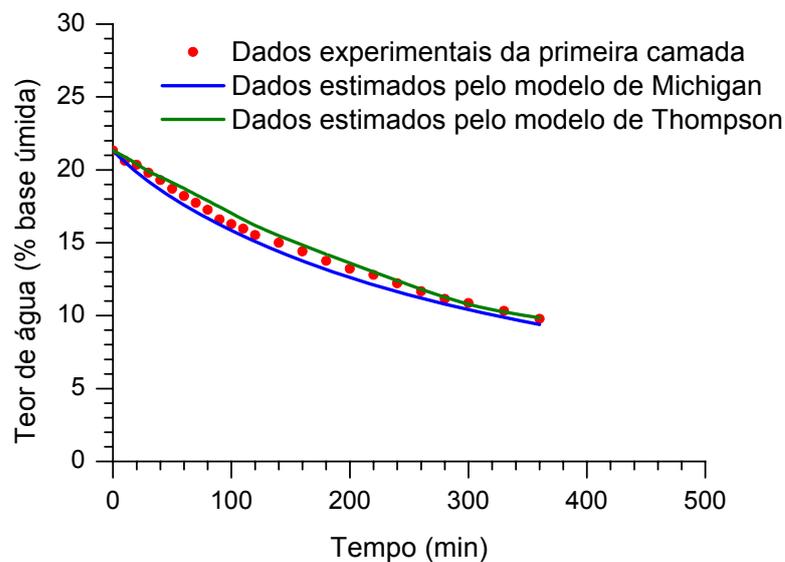


Figura 37 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.

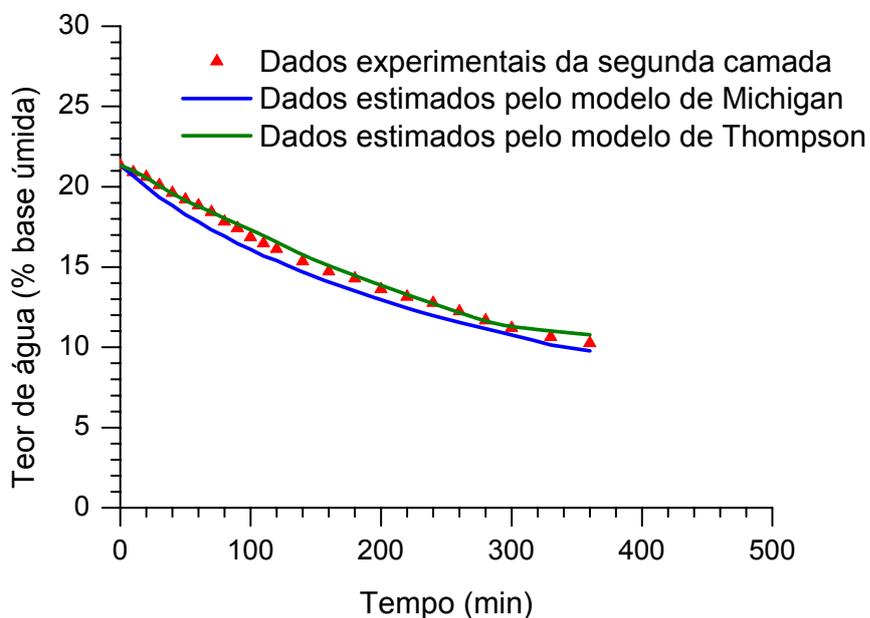


Figura 38 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida.

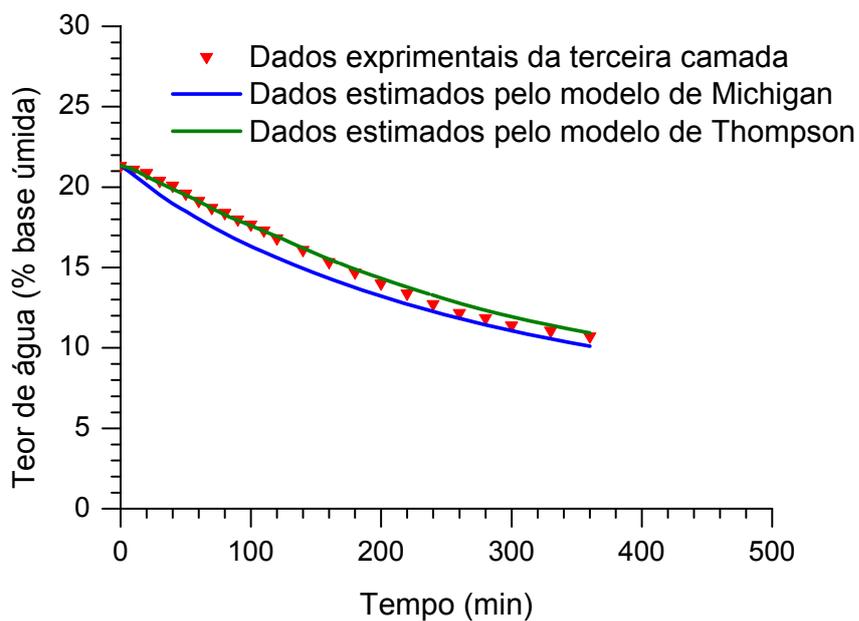


Figura 39 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida.

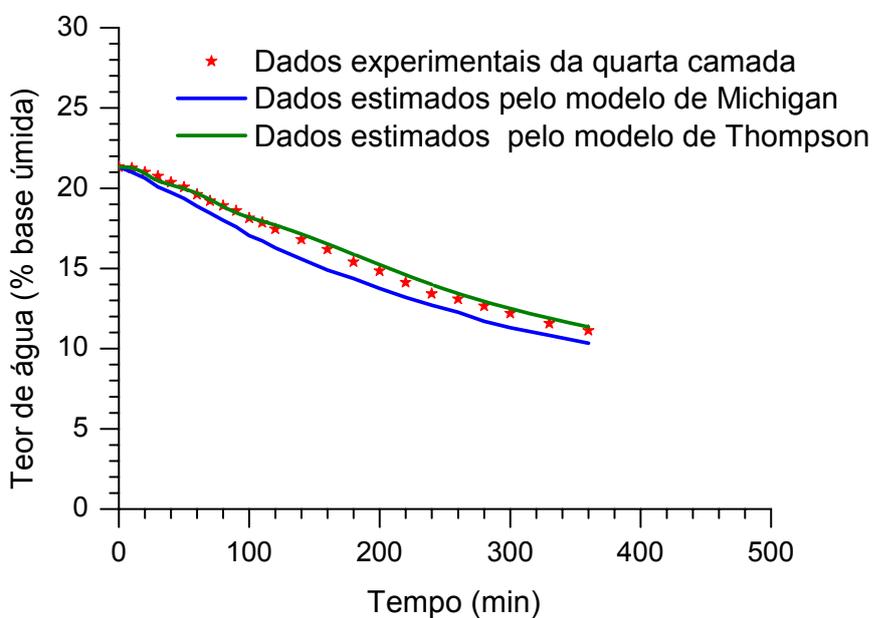


Figura 40 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida.

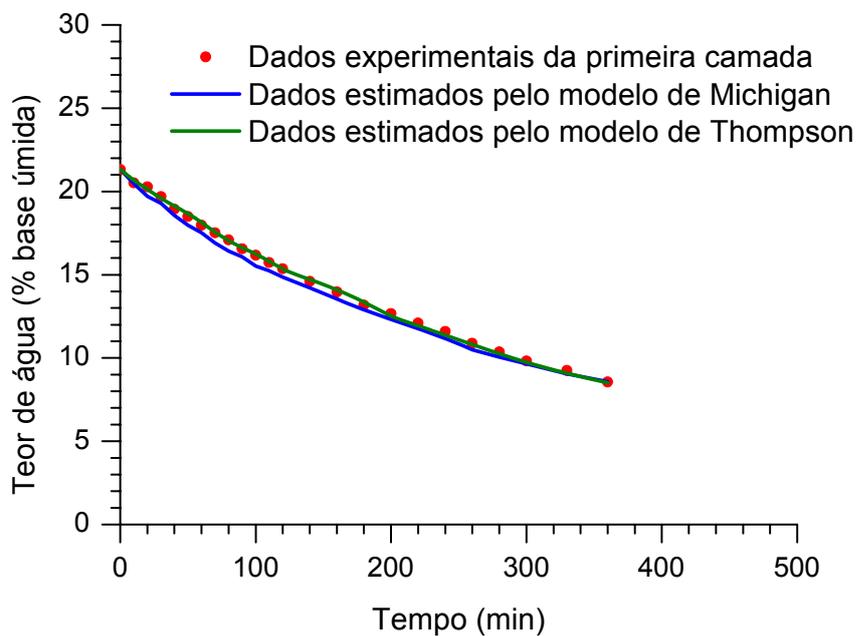


Figura 41 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, temperatura de 70 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.

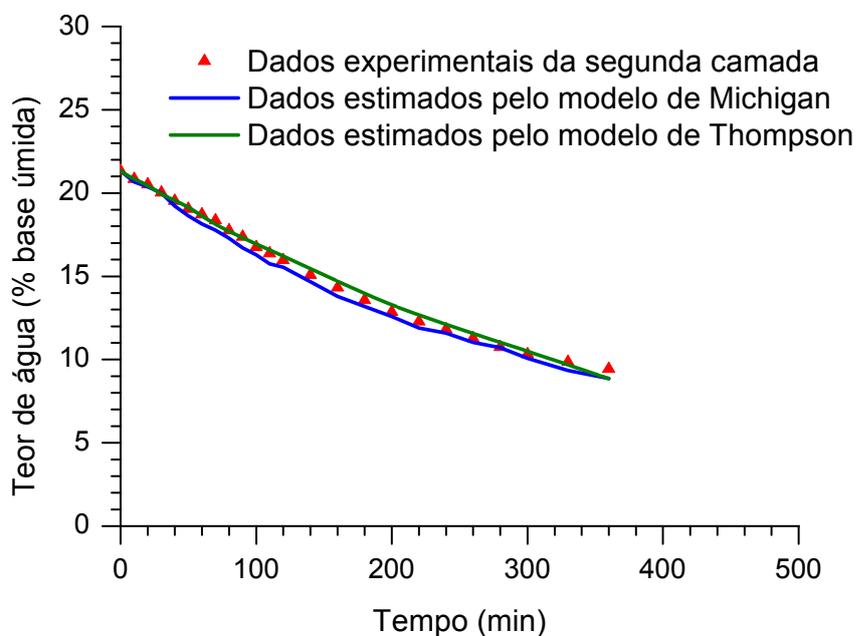


Figura 42 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida.

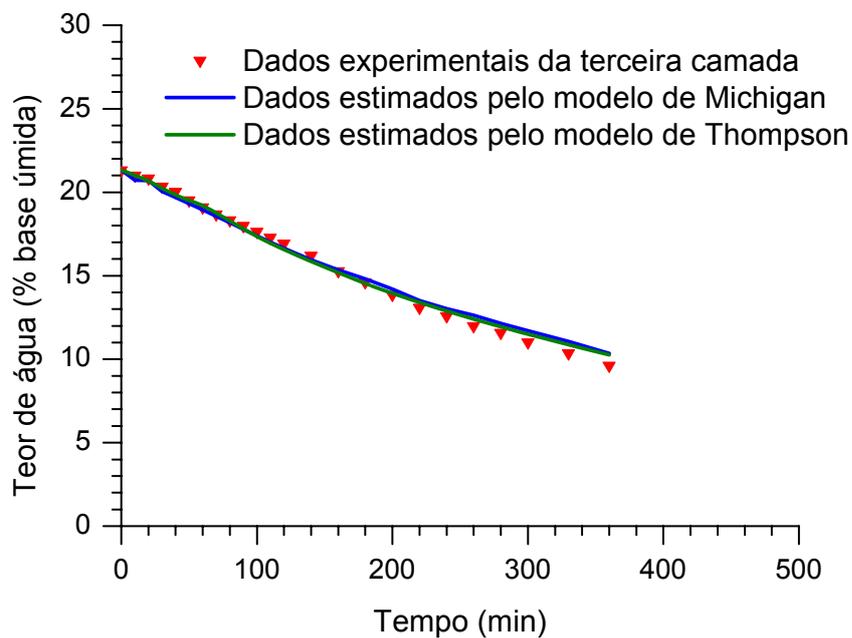


Figura 43 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida.

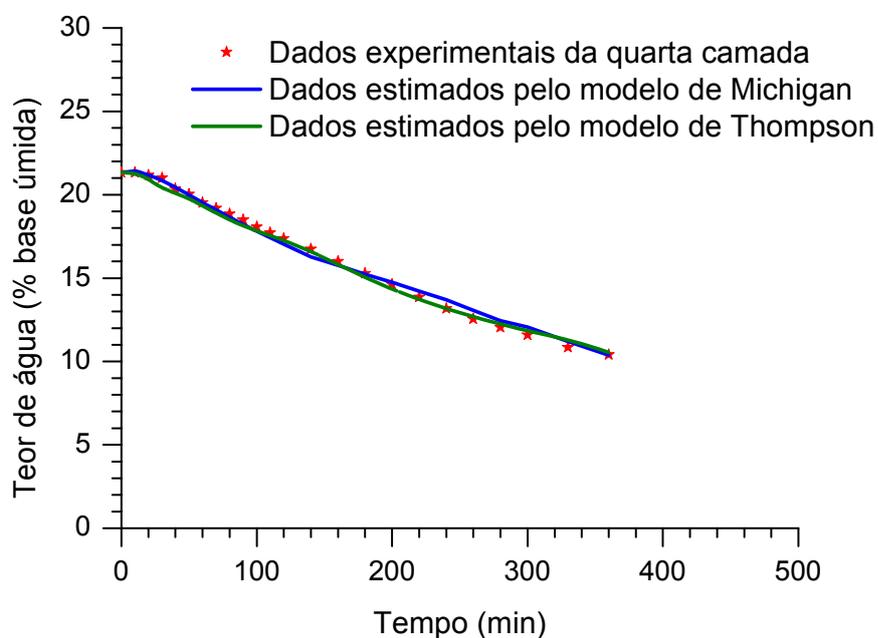


Figura 44 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida.

Na Tabela 15 encontram-se quantificados os desvios médios entre os dados experimentais e os obtidos por meio da simulação de secagem, do teor de água médio do produto em função da temperatura do ar e da camada do produto no interior do secador. Verifica-se que para o modelo de Michigan os valores oscilaram entre 1,5 e 5,3 %. No modelo de Thompson esses valores ficaram entre 1,0 e 4,0 %. Considerando-se o total dos valores tem-se um valor médio de 3,36 % e 2,05 %, respectivamente.

Tabela 15 – Desvio percentual médio (DPM) entre os dados experimentais do teor de água médio do feijão-macáçar e os estimados pelos respectivos modelos.

Camada	Modelo de Michigan			Modelo de Thompson		
	Temperatura (°C)			Temperatura (°C)		
	50	60	70	50	60	70
1 ^a	2,4	3,4	2,4	2,5	2,0	1,0
2 ^a	3,0	4,5	2,4	3,5	1,0	1,25
3 ^a	4,1	5,0	2,8	2,8	1,4	1,75
4 ^a	3,6	5,3	1,5	4,0	2,0	1,4

De acordo com os dados contidos nos ANEXOS 11 a 16, o tempo gasto para reduzir o teor de água do feijão-macáçar de 21,5 % para 10 %, base úmida, foi de 420 minutos na temperatura de 50 °C, 360 minutos na temperatura de 60 °C e 300 minutos na temperatura de 70 °C, abrangendo as quatro camadas de 15 cm de espessura.

As curvas mostrando a variação da temperatura da massa de grãos durante a secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C podem ser visualizadas nas Figuras 45, 46 e 47. Verifica-se que para as três temperaturas estudadas, a temperatura da massa de grãos leva cerca de 100 minutos, aproximadamente, para entrar em equilíbrio com a temperatura do ar de secagem. O desvio percentual médio (DPM) entre a temperatura medida experimentalmente e a fornecida pelo modelo um encontra-se na Tabela 16. O valor médio do desvio em cada experimento foi de 3,4, 3,75 e 3,7 %, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, respectivamente. Os valores experimentais e os preditos encontram-se nos ANEXOS 17, 18 e 19.

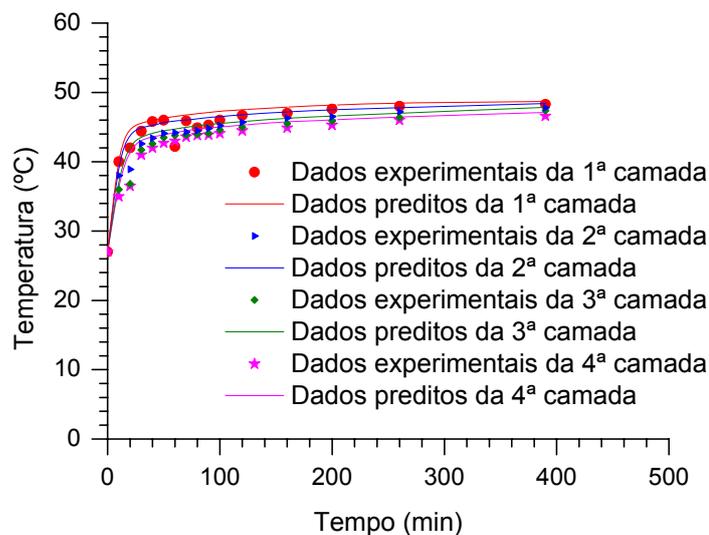


Figura 45 – Dados experimentais e estimados da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, temperatura de 50 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.

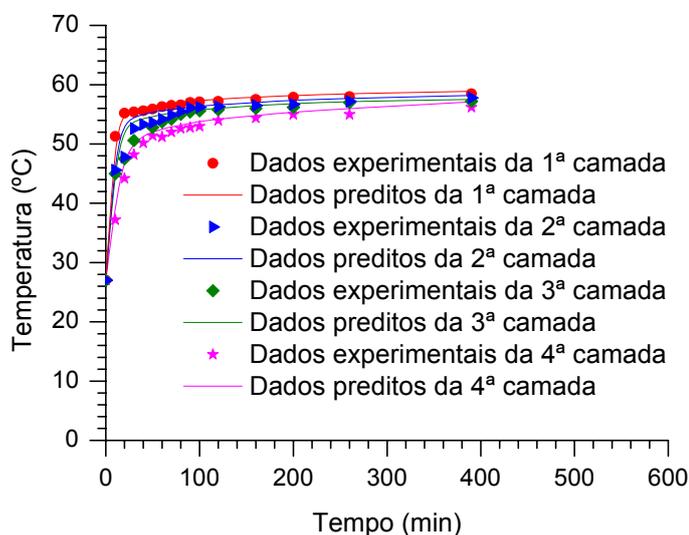


Figura 46 – Dados experimentais e estimados da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.

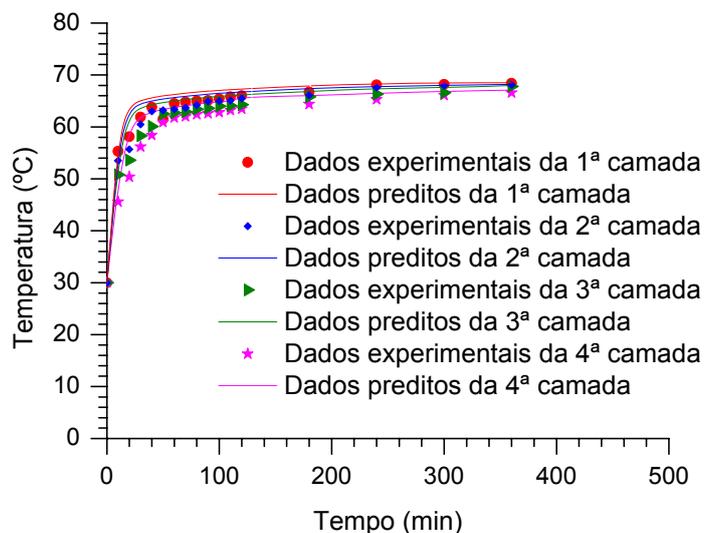


Figura 47 – Dados experimentais e estimados da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, temperatura de 70 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.

Tabela 16 – Desvio percentual médio (DPM) entre os dados experimentais e os preditos pelo modelo de Michigan, da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida.

Camada	Temperatura (°C)		
	50	60	70
1ª	3.0	1.5	3.0
2ª	4.0	2.5	3.1
3ª	3.5	7.5	4.2
4ª	3.25	3.5	4.5

4.6.2 – Curvas de secagem do produto com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida.

As Figuras 48 a 59 contêm as curvas de secagem em camada espessa obtidas experimentalmente e as obtidas por simulação utilizando o modelo de Michigan e o

modelo de Thompson, para as temperaturas de 50, 60 e 70 °C. Os dados experimentais e os estimados encontram-se nos ANEXOS 20 a 25.

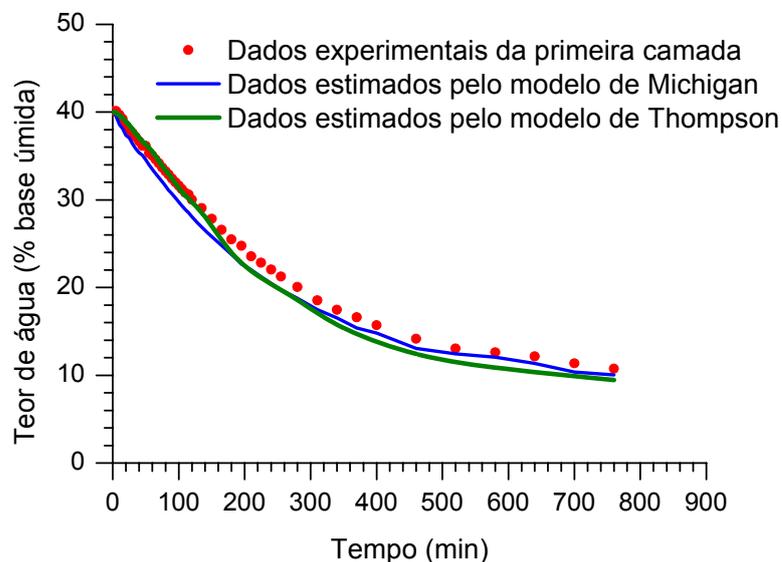


Figura 48 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida, temperatura de 50 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

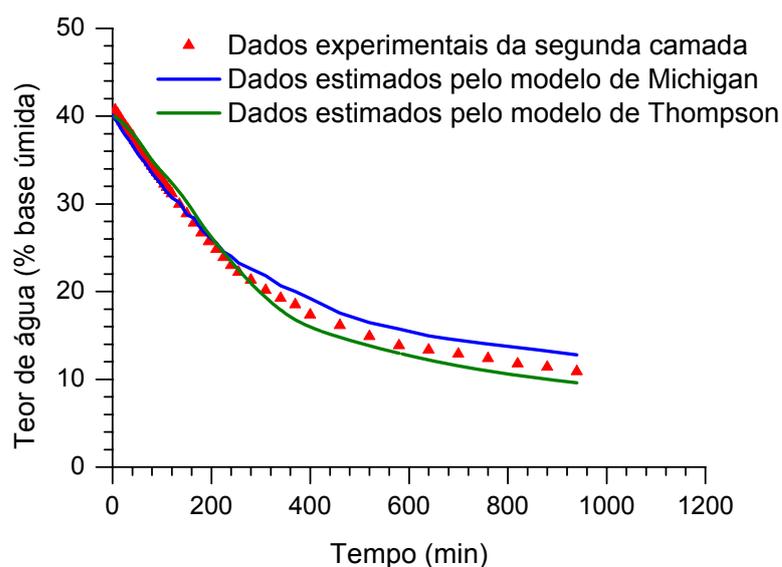


Figura 49 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida.

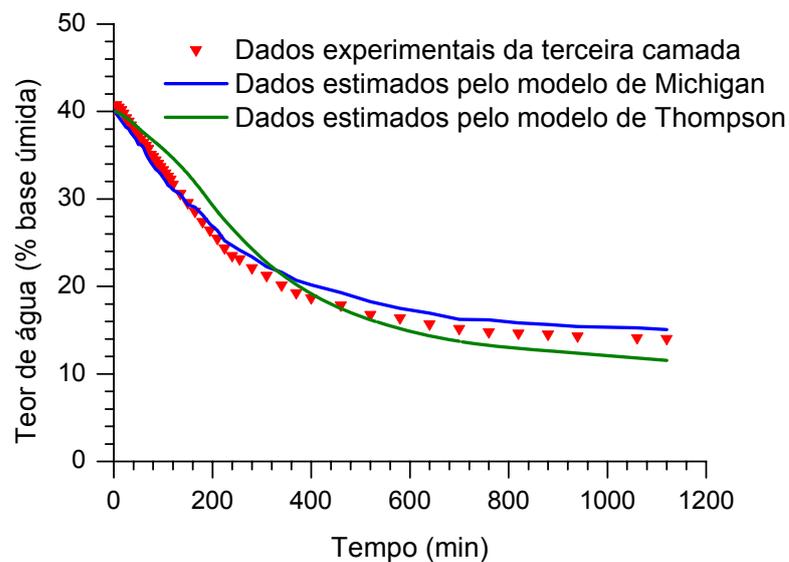


Figura 50 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida.

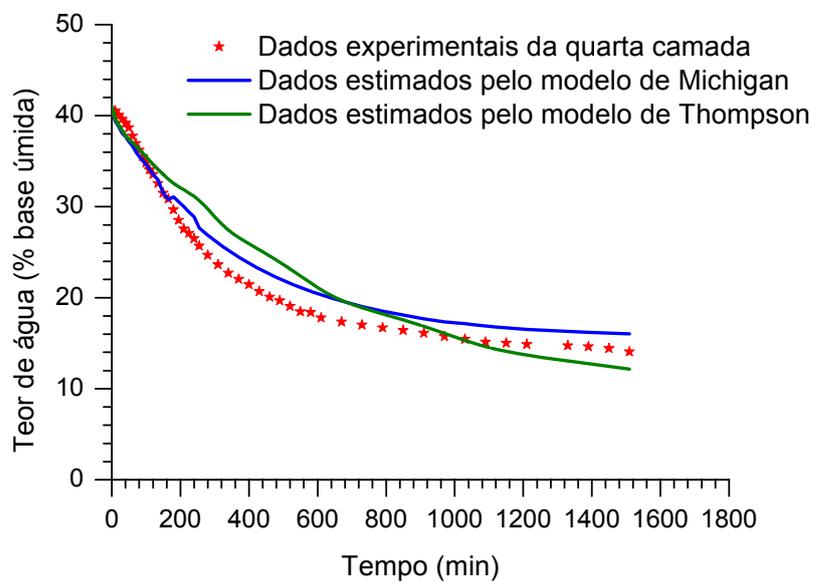


Figura 51 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida.

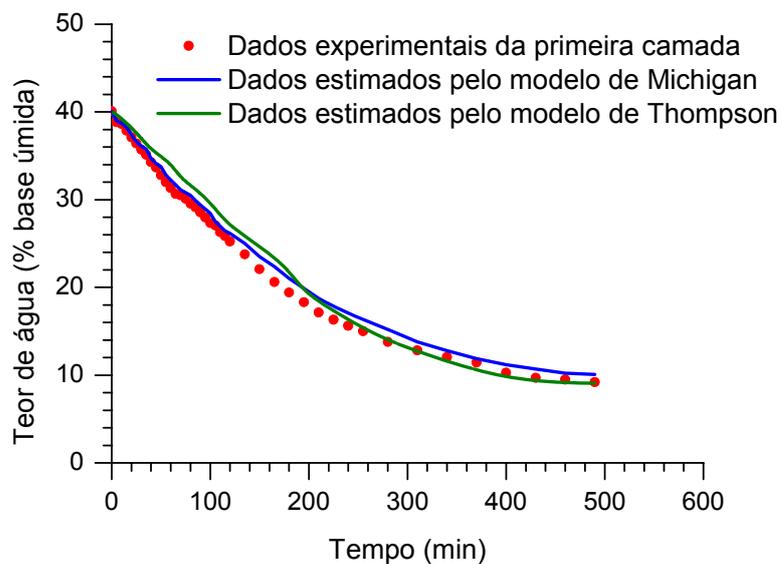


Figura 52 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida, temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

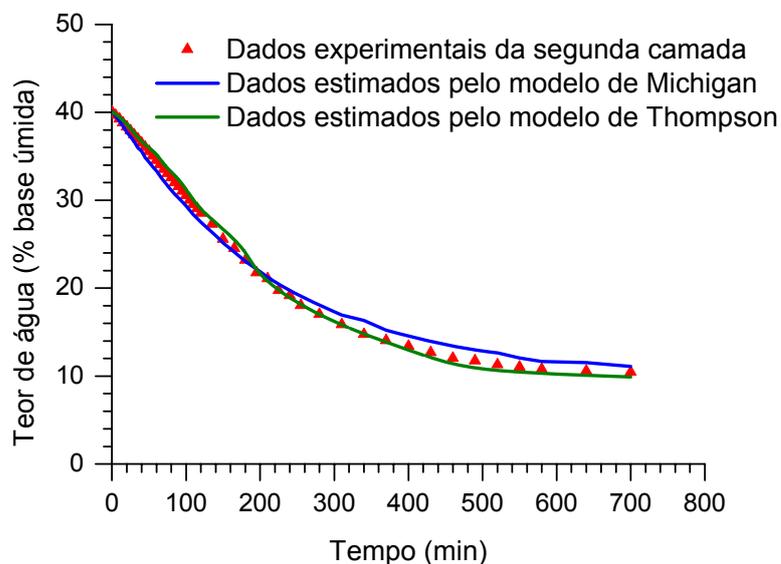


Figura 53 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida.

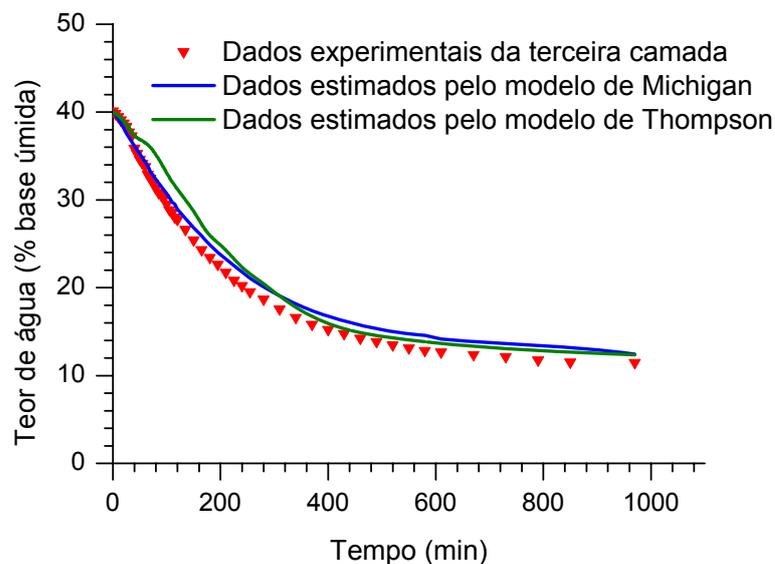


Figura 54 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida.

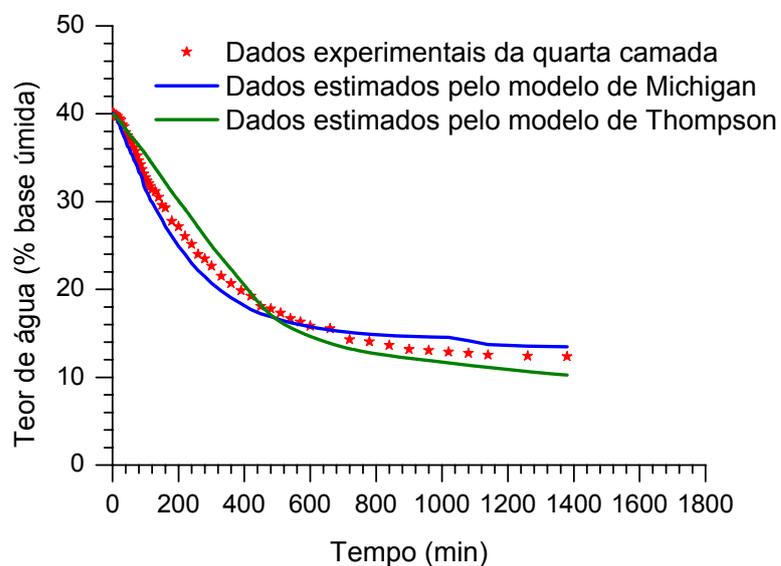


Figura 55 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida.

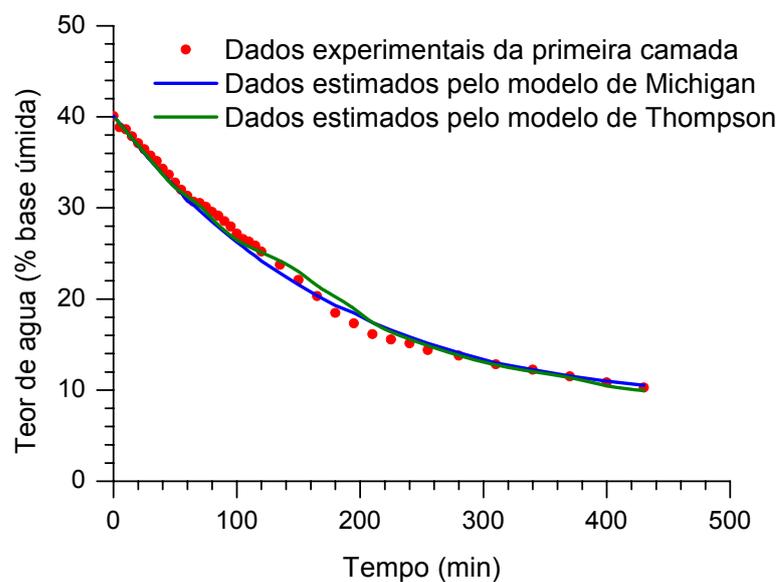


Figura 56 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida, temperatura de 70 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

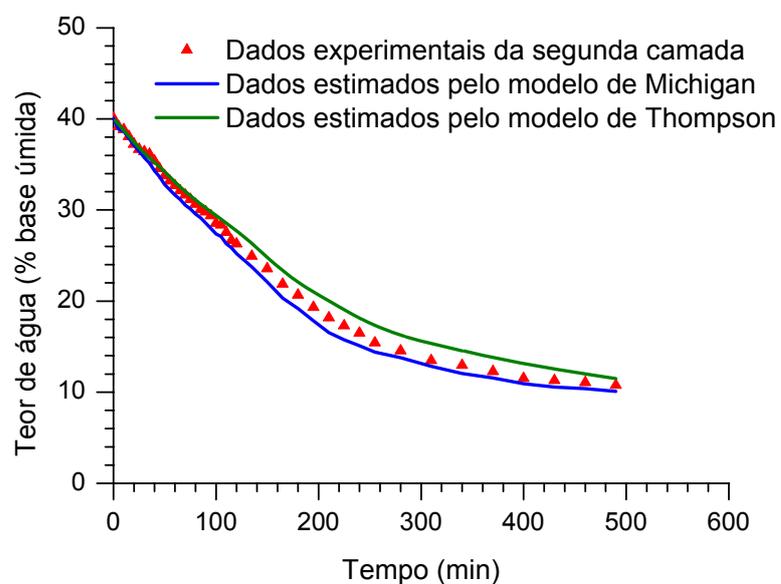


Figura 57 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida.

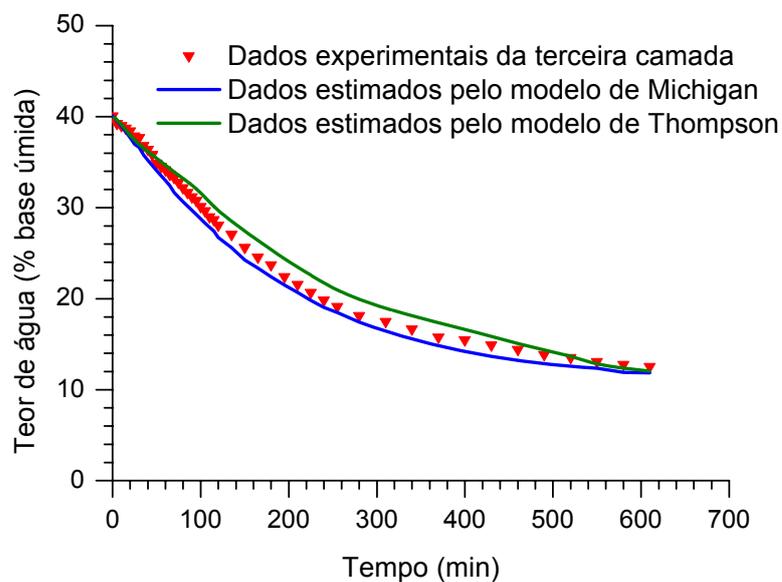


Figura 58 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida.

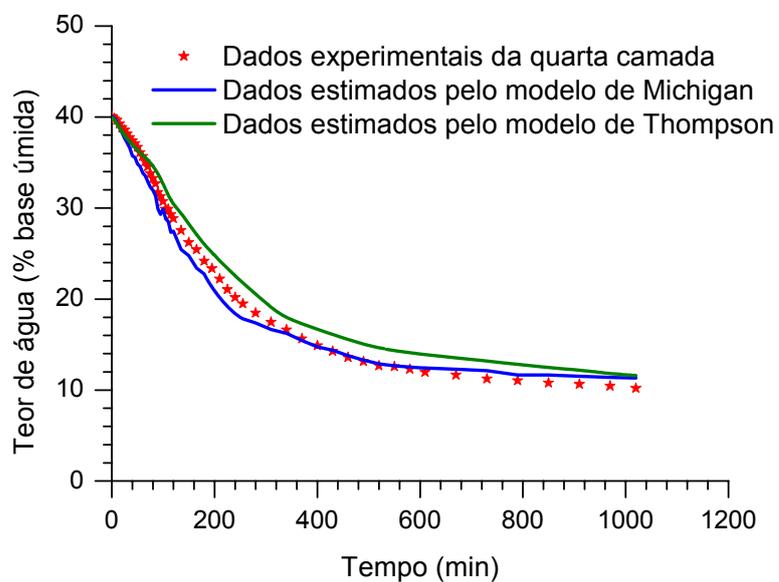


Figura 59 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida.

Na Tabela 17 encontram-se os valores dos desvios entre os dados experimentais e os estimados pelos modelos de Michigan e de Thompson para o teor de água do produto. O desvio médio entre os dados experimentais e os estimados pelo modelo de Michigan variaram de 2,7 a 7,9 %, e de 3,0 a 9,3 % para o modelo de Thompson, considerando a totalidade dos valores, o desvio médio foi de 4,92 % e de 6,1 %, respectivamente.

Tabela 17 – Desvio percentual médio (DPM) entre os dados experimentais do teor de água médio do feijão-macáçar e os estimados pelos respectivos modelos.

Camada	Modelo de Michigan			Modelo de Thompson		
	Temperatura (°C)			Temperatura (°C)		
	50	60	70	50	60	70
1 ^a	5,4	4,5	2,7	5,0	5,6	3,0
2 ^a	5,0	4,6	4,3	4,7	6,4	4,6
3 ^a	4,1	6,0	4,5	7,5	7,6	4,0
4 ^a	7,9	5,5	4,6	9,3	7,9	7,8

De acordo com os dados contidos nos ANEXOS 20 a 25, o tempo gasto para reduzir o teor de água do feijão-macáçar de 40% para um valor médio de 12 %, base úmida, foi de 1510 minutos na temperatura de 50 °C, 1380 minutos na temperatura de 60 °C e 910 minutos na temperatura de 70 °C, compreendendo quatro camadas de 15 cm de espessura.

As curvas mostrando o perfil de temperatura das camadas de grãos são apresentadas nas Figuras 60 61 e 62. Os desvios (DPM) entre a temperatura medida experimentalmente e a predita pelo modelo de Michigan encontram-se na Tabela 18. O valor médio do desvio em cada experimento foi de 4,75, 5,70 e 3,55 %, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, respectivamente. Os valores experimentais e os simulados encontram-se nos ANEXOS 26, 27 e 28.

Tabela 18 – Desvio percentual médio (DPM) entre os dados experimentais e os preditos pelo modelo de Michigan da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida.

Camada	Temperatura (°C)		
	50	60	70
1 ^a	1,7	4,4	1,7
2 ^a	3,2	4,2	2,8
3 ^a	5,8	5,8	3,9
4 ^a	8,3	8,3	5,8

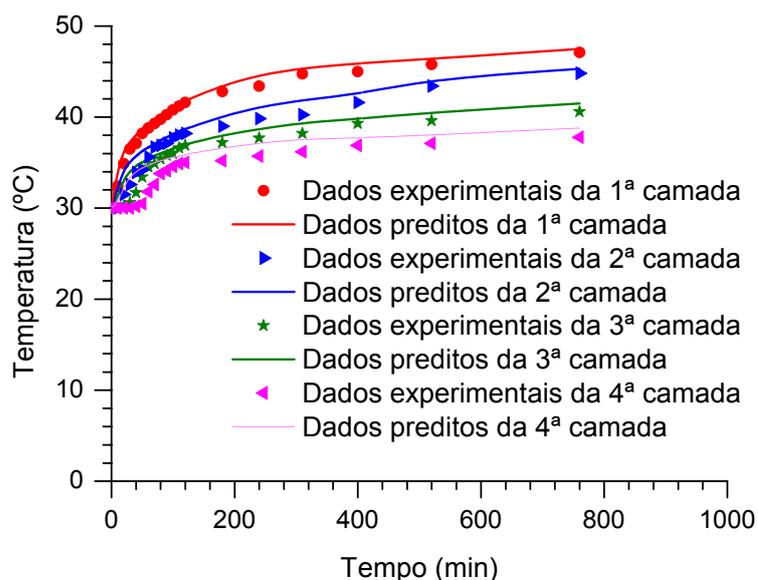


Figura 60 – Dados experimentais e estimados da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida, temperatura de 50 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

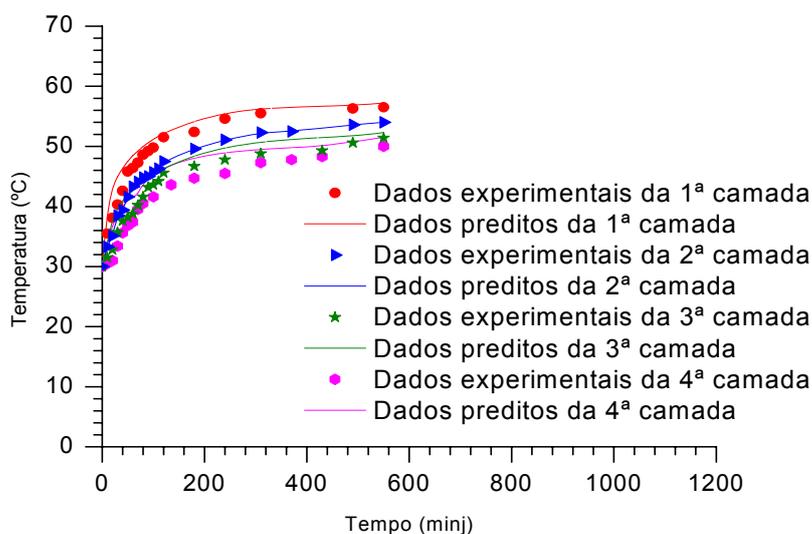


Figura 61 – Dados experimentais e estimados da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida, temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

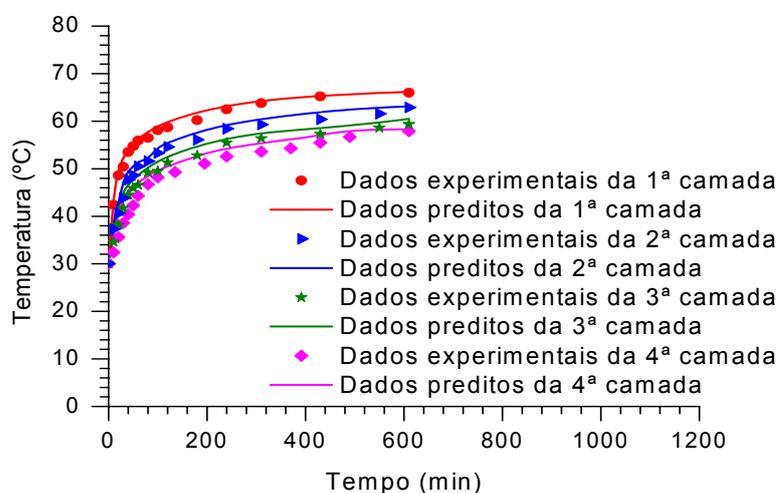


Figura 62 – Dados experimentais e estimados da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida, temperatura de 70 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

4.6.3 – Curvas de secagem do produto com teor médio de água inicial de 64%, base úmida.

As Figuras 63 a 69 contêm as curvas de secagem em camada espessa obtidas experimentalmente e as obtidas por simulação utilizando o modelo de Michigan e o modelo de Thompson, respectivamente, para as temperaturas de 50, 60 e 70 °C. Os dados experimentais e estimados encontram-se nos ANEXOS 29 a 33.

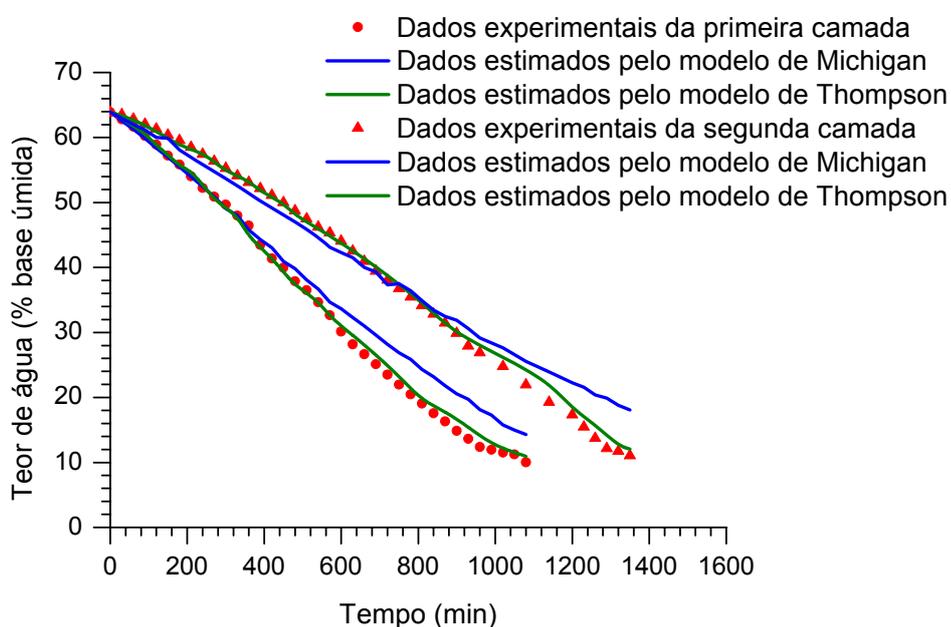


Figura 63 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 64 %, base úmida, temperatura de 50 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

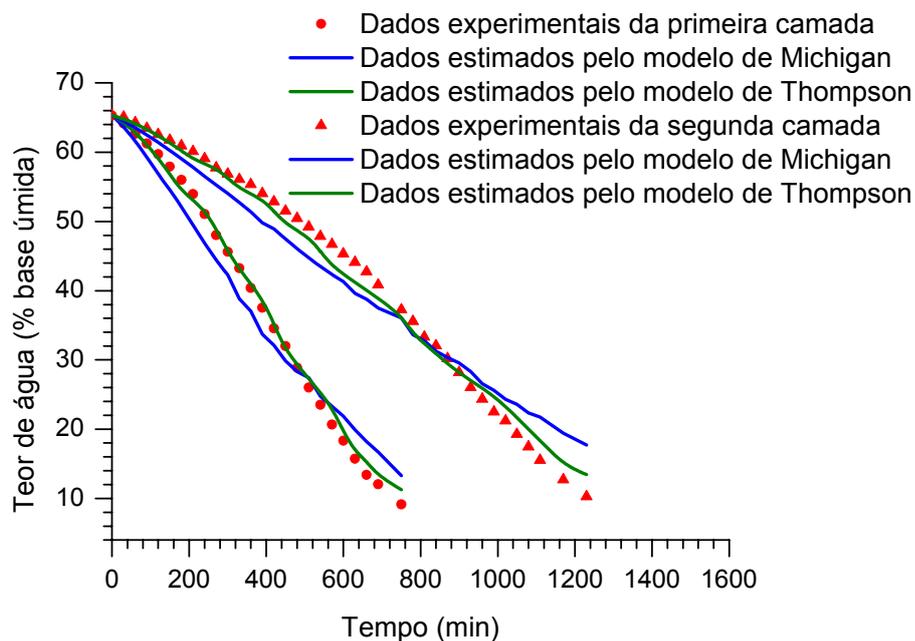


Figura 64 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 64 %, base úmida, temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

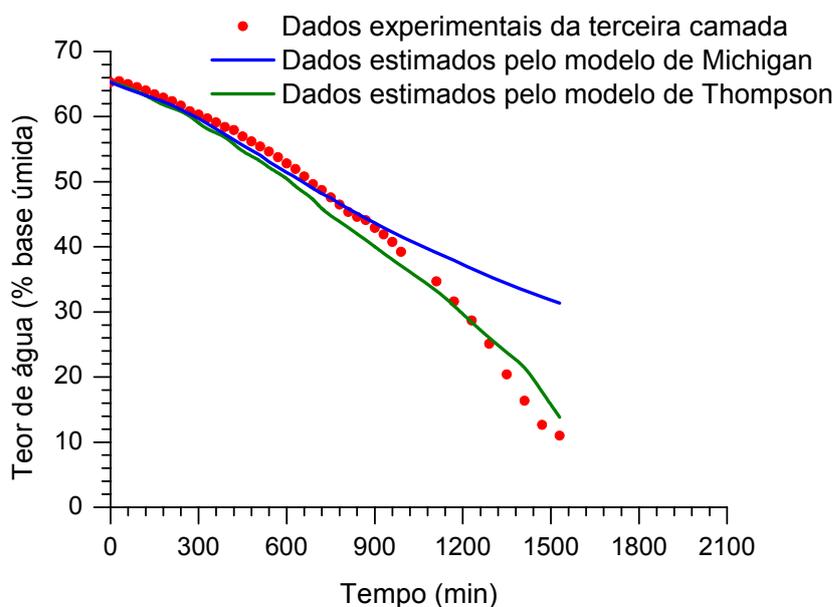


Figura 65 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 64 %, base úmida.

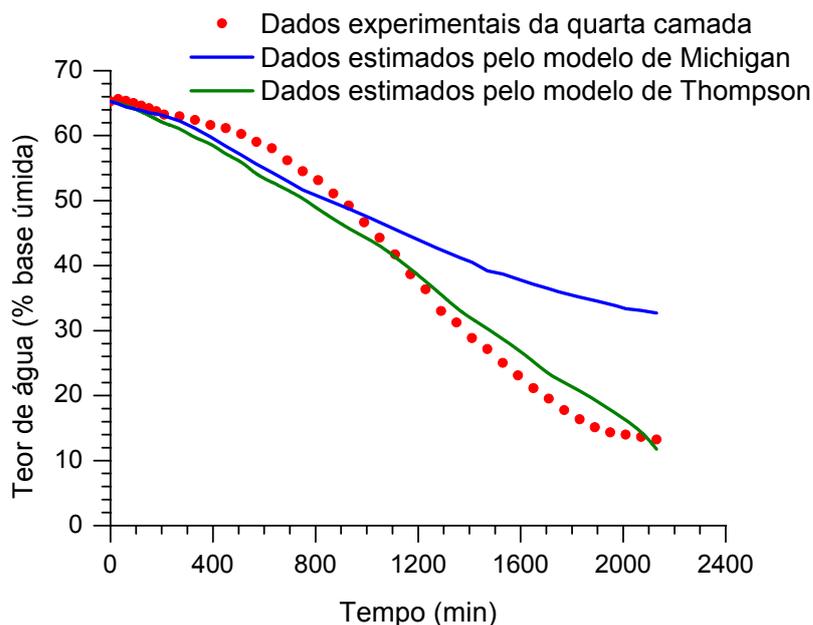


Figura 66 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 64 %, base úmida.

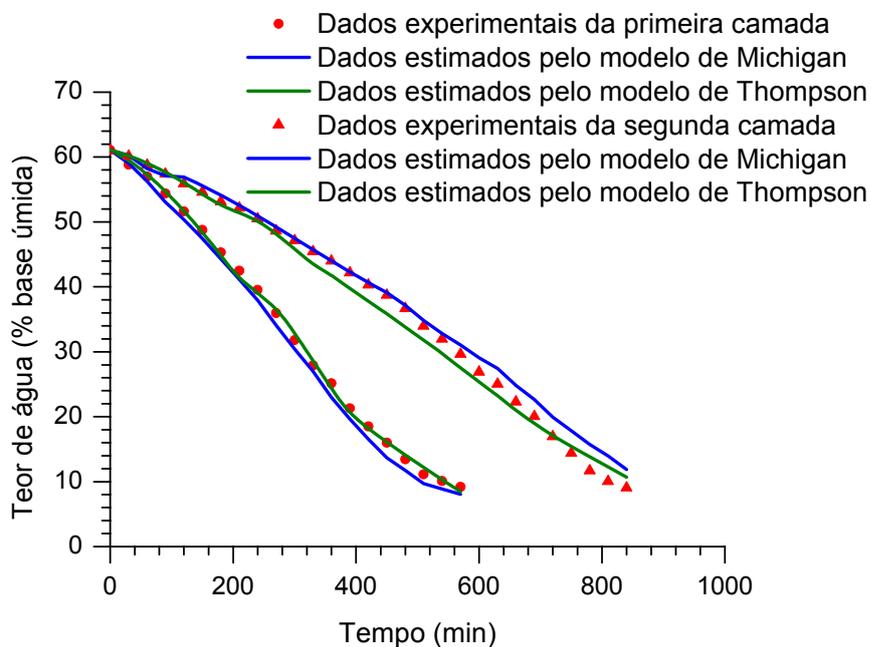


Figura 67 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 62 %, base úmida, temperatura de 70 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

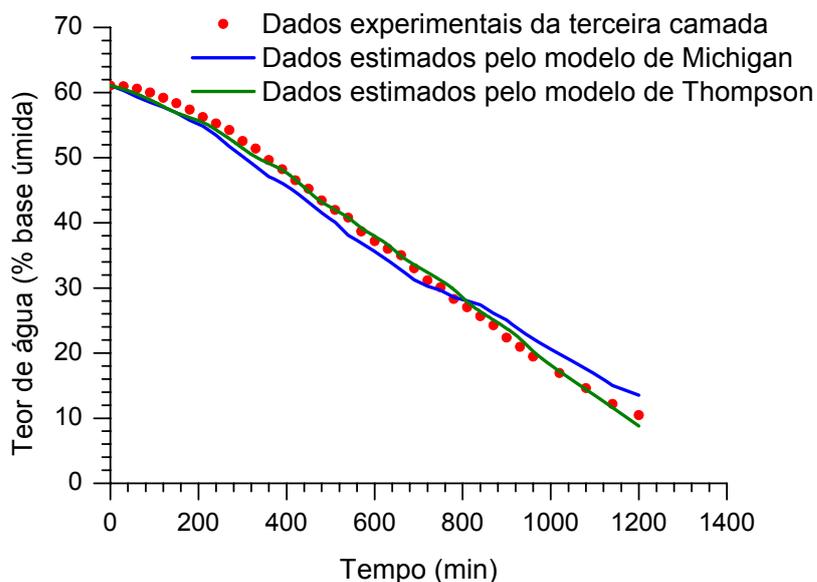


Figura 68 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 62 %, base úmida.

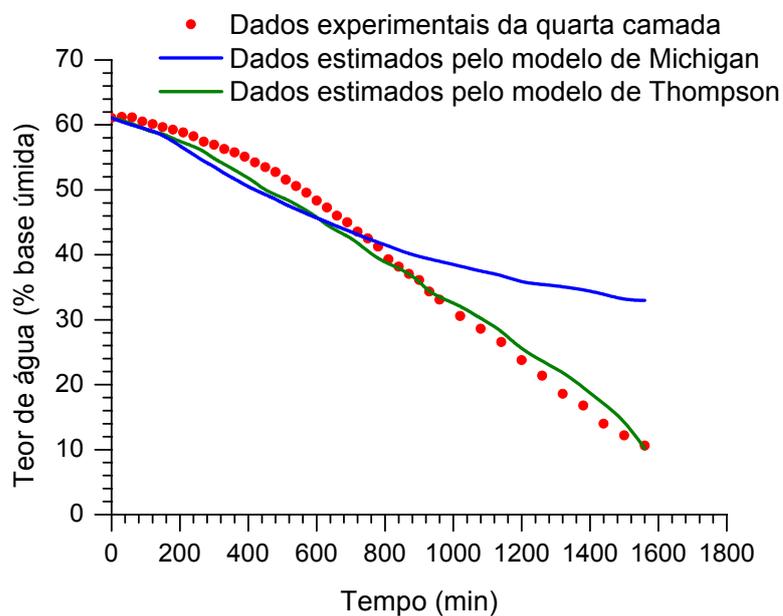


Figura 69 – Dados experimentais e estimados da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 62 %, base úmida.

Conforme os valores contidos na Tabela 19, o desvio médio entre os dados experimentais e os estimados para o modelo de Michigan variaram de 6,15 a 35,9 %, e de 2,7 a 7,65 % para o modelo de Thompson. Considerando a totalidade dos valores, o desvio médio foi de 14,92 % e de 4,73 %, para o modelo de Michigan e para o modelo de Thompson, respectivamente.

Tabela 19 – Desvio percentual médio (DPM) entre os dados experimentais do teor de água médio do feijão-macáçar e os estimados pelos respectivos modelos.

Camada	Modelo de Michigan			Modelo de Thompson		
	Temperatura (°C)			Temperatura (°C)		
	50	60	70	50	60	70
1 ^a	14,8	11,40	6,15	2,70	3,15	2,70
2 ^a	12,8	10,55	7,60	4,70	5,15	4,60
3 ^a	----	16,00	6,50	----	7,50	2,70
4 ^a	----	35,90	27,5	----	7,65	6,50

Nas Figuras 70, 71 e 72 encontram-se os perfis de temperatura das camadas de grãos. Os desvios (DPM) entre a temperatura medida experimentalmente e a predita pelo modelo de Michigan encontram-se na Tabela 20. O valor médio do desvio em cada experimento foi de 5,35, 4,8 e 3,85 %, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, respectivamente. Os valores experimentais e os simulados encontram-se nos ANEXOS 34, 35 e 36.

Tabela 20 – Desvio percentual médio (DPM) entre os dados experimentais e os preditos pelo modelo de Michigan da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 62 %, base úmida.

Camada	Temperatura (°C)		
	50	60	70
1 ^a	5.6	5.3	4.8
2 ^a	5.1	5.7	4.8
3 ^a	----	4.2	3.3
4 ^a	-----	4.1	2.5

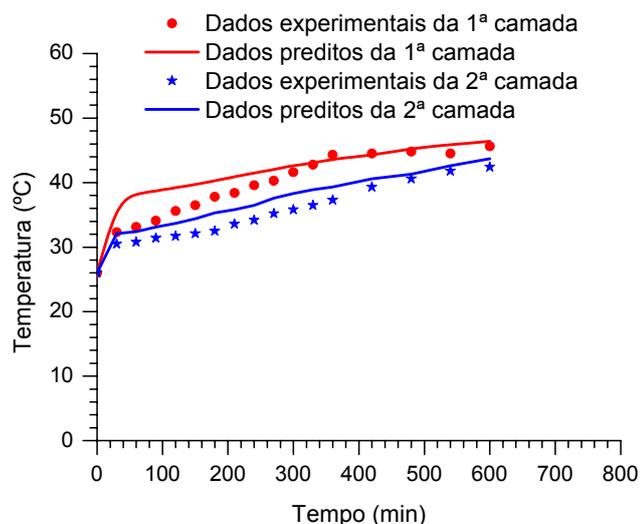


Figura 70 – Dados experimentais e estimados da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 62 %, base úmida, temperatura de 50 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

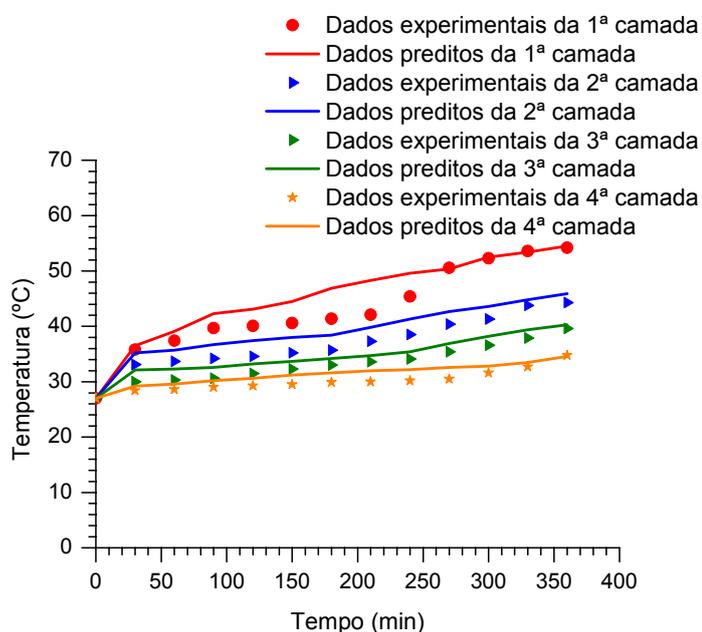


Figura 71 – Dados experimentais e estimados da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 62 %, base úmida, temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

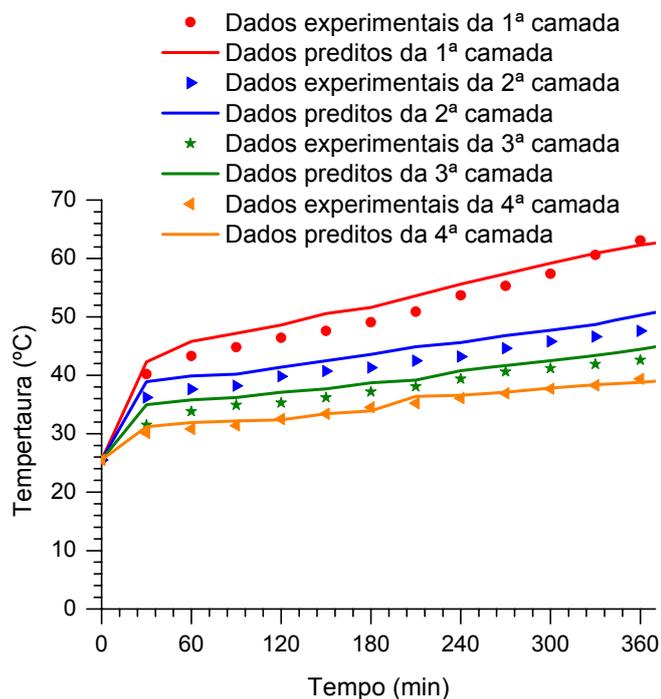


Figura 72 – Dados experimentais e estimados da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 62 %, base úmida, temperatura de 70 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

4.6.4 – Avaliação dos modelos de Michigan e de Thompson

Levando-se em consideração que durante a realização deste trabalho trabalhou-se com o produto com três teores de água inicial distintos, a avaliação dos modelos utilizados é feita levando-se em consideração o teor de água inicial do produto.

O feijão-macáçar com teor médio de água de 65 %, base úmida, é conhecido comercialmente como feijão-verde. Normalmente, é colhido antes de completar seu processo de maturação fisiológica, ou seja, o cotilédone ainda não está completamente formado, existindo um espaço a ser preenchido entre as duas partes que o compõe, conforme pode ser visualizados na Figura 73. A mesma observação vale para a parte externa do cotilédone, isto é, a parte que fica em contato com o tegumento. Assim sendo, observa-se que, nessa fase, a água ocupa o espaço naturalmente destinado à massa granular. Durante a operação de secagem nas temperaturas de 60 e 70 °C ocorre a

evaporação muito rápida da água que se encontra em seu estado mais livre, causando trincas tanto na parte interna do grão (cotilédone) quanto em seu tegumento, conseqüentemente, o ar penetra através das trincas e preenche os espaços antes ocupados pela água, ou seja, há um aumento da área superficial do produto durante a operação de secagem. O enrugamento do grão e o aumento da porosidade da massa de grãos também são efeitos desse mesmo processo. Esses fenômenos afetam a estrutura física do produto e têm influência no processo de secagem. No entanto, são difíceis de serem quantificados durante o processo de simulação.



Figura 73 – Corte transversal de grãos de feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 65%, base úmida.

O alto teor de água contido no produto também é o principal responsável pela sensível diminuição da temperatura e do aumento da umidade relativa do ar à medida que esse atravessa as camadas do produto. A perda da capacidade calorífica do ar de secagem faz com que nos primeiros sessenta minutos de secagem, aproximadamente, a água retirada das camadas um e dois fique retida nas camadas três e quatro. Um segundo problema decorrente da diminuição da temperatura do ar de secagem é que os valores dos parâmetros da equação de camada fina (K e N) foram validados para temperaturas entre 40 e 70 °C, experimentalmente, e extrapolados para 35 e 70 °C. Assim sendo, valores inferiores estão fora da abrangência dos parâmetros. Conforme pode ser verificado na Tabela 19, os desvios são bem maiores nas camadas três e quatro, possivelmente, decorrente dos baixos valores da temperatura nessas camadas. Esse foi o

motivo pelo qual na temperatura de 50 °C só foi possível simular duas camadas, conforme Figura 63.

O produto com teor médio de água inicial de 21,5 % e 40 %, base úmida, já atingiu sua fase de maturação fisiológica, ou seja, o percentual de água contido no produto é inferior ao percentual de massa seca. Portanto, durante a operação de secagem do produto não ocorre os fenômenos detectados durante a secagem do produto com alto teor de água. Assim sendo, quando se analisam os valores preditos pelos modelos de Michigan e Thompson para a cinética de secagem do feijão-macáçar, constata-se que as diferenças estão situadas dentro da margem de aceitação para um trabalho de pesquisa.

Os programas utilizados para simular a secagem em leito fixo pelos modelos de Michigan e de Thompson encontram-se nos ANEXOS 35 e 36.

5 – CONCLUSÕES

Para as condições em que este trabalho foi realizado, pôde-se chegar às seguintes conclusões em relação ao feijão-macáçar (*Vigna unguiculata (L.) Walpers*):

- a massa específica aparente do feijão-macáçar tende à diminuir à medida que ocorre um decréscimo no seu teor de água;
- dentre os modelos matemáticos empregados para ajustar os dados experimentais de teor de água de equilíbrio, os modelos de Henderson-Thompson e Henderson-Thompson modificado por Cavalcanti Mata foram os que proporcionaram os melhores ajustes;
- o calor latente de vaporização decresceu com o aumento do teor de água de equilíbrio do produto;
- o calor específico aumentou linearmente com o aumento do teor de água do produto;
- durante a realização de secagem em camada fina, a temperatura e a velocidade do ar de secagem tiveram efeito significativo sobre o valor de ‘K’, e o teor de água inicial, sobre o valor de ‘N’, as duas constantes da equação de Page;
- nas amostras de feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 65 %, base úmida, o aumento isolado da velocidade do ar causa aumento na taxa de secagem;
- o teor de água inicial foi a variável que exerceu maior efeito sobre a taxa de secagem em camada fina, seguido da temperatura e da velocidade do ar de secagem;
- o tempo gasto para reduzir o teor de água do feijão-macáçar de 21,5 % para um valor médio de 10 %, base úmida, foi de 420 minutos na temperatura de 50 °C, 360 minutos na temperatura de 60 °C e 300 minutos na temperatura de 70 °C, considerando uma camada de 60 cm de espessura;

- o tempo gasto para reduzir o teor de água do feijão-macáçar de 40 % para um valor médio de 11 %, base úmida, foi de 1120 minutos na temperatura de 50 °C, 1380 minutos na temperatura de 60 °C e 910 minutos na temperatura de 70 °C, sendo que, na temperatura de 50 °C foram consideradas três camadas de 15 cm, ou seja, 45 cm de espessura;
- o tempo gasto para reduzir o teor de água do feijão-macáçar de 65 % para um valor médio de 11 %, base úmida, camada de 15 cm de espessura, foi de 730 minutos na temperatura de 50 °C, 1230 minutos para duas camadas a temperatura de 60 °C, 1200 minutos para três camadas a temperatura de 70 °C;
- os modelos matemáticos para simulação de secagem em leito fixo proposto por THOMPSON *et al.* (1968) e BAKKER-ARKEMA *et al.* (1974), com as modificações citadas neste trabalho, simularam satisfatoriamente a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor de água inicial de 21,5 e 40 %, base úmida;
- para o produto com teor médio de água inicial de 65 %, base úmida, o modelo de THOMPSON *et al.* (1968) apresentou menores desvios entre os dados experimentais e os preditos.

6 – SUGESTÕES

Verificar a validade da metodologia utilizada neste trabalho para outros produtos de origem biológica, assim como, comparar os modelos matemáticos aqui utilizados com os demais modelos encontrados na literatura.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO JÚNIOR P. C.; CORRÊA, P. C. Cinética da contração volumétrica dos grãos de duas cultivares de milho-pipoca durante o processo de secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.2, n.1, p.61-65, 2000.
- AGULLO, J. O.; MARENIA, M. O. Airflow resistance of parchment arabica coffee. **Biosystems Engineering**, v.91, n.2, p.149-156, 2005.
- AJIBOLA, O. O.; AVIARA, N. A.; AJETUMOBI, O. E. Sorption equilibrium and thermodynamic properties of cowpea (*Vigna unguiculata*). **Journal of Food Engineering**, v.58, p.317-324, 2003.
- ALVARENGA, L. C. de; FORTES, M.; PINHEIRO FILHO, J. B.; HARA, T. Transporte do teor de água no interior de grãos de feijão-preto sob condições de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.5, n.1, p.5-18, 1980.
- ARAÚJO, J. P. P. de; RIOS, G. P.; WATT, E. E.; *et al.* **Cultura do caupi, *Vigna unguiculata* (L) Walp; descrição e recomendações técnicas de cultivo**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1984. 82p. (Circular Técnica n.º 18)
- BAKKER-ARKEMA, F.W.; LEREW, L. E.; DE BOER, S. F.; ROTH, M. G. **Grain dryer simulation**. Michigan, ARS-USDA, 1974; 80p. (Research Report n. 224)
- BASUNIA, M. A.; ABE, T. Moisture adsorption isotherms of rough rice. **Journal of Food Engineering**, v.42, p.235-242, 1999.
- BASUNIA, M. A.; ABE, T. Thin-layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. **Journal of Food Engineering**, v.47, p.295-301, 2001.
- BERBERT, P. A.; QUEIROZ, D. M.; PINHEIRO FILHO, J. B. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal Agricultural Engineering Research**, v.60, p.167-173, 1995.
- BEVITORI, R.; NEVES, B. P. das; RIOS, G. P.; *et al.* **A cultura do caupi. Informe Agropecuário**, Belo Horizonte: v.16, n.174, p.12-20, 1992.
- BIAGIONI, M. A. M.; PIZA, P. L. B. T.; FERREIRA, W.A. Queda de pressão estática por meio de uma coluna de noz macadâmia. **Eng. Agric. Jaboticabal**, v.25, n.2, p.499-507, 2005.
- BORÉM, F. M.; RIBEIRO, R.C.M.S.; CORRÊA, P. C.; *et al.* Propriedades térmicas de cinco variedades de café cereja descascado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.3, 475-480, 2002.

- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**, Brasília, DF, 1992. 365p.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and Storage of Grains and Oilseeds**. New York: AVI, 1992. 450p.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying cereal grains**. Connecticut, the AVI publishing company, inc. 1974. 450p.
- BUTTON, S. T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados**. Campinas. Universidade Estadual de Campinas, 2005, 88p. (Apostila)
- CALEGARI, A. **Leguminosas para adubação verde de verão no Paraná**. Londrina: IAPAR, 1995. 118p. (Circular n.º 80)
- CARMO, J. E. F. **Fenômenos de Difusão Transiente em Sólidos Esferoidais Oblatos. Estudo de Caso: Secagem de Lentilhas**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2004. 139p. (Tese)
- CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. **Efeitos da secagem em altas temperaturas por curtos períodos de tempo, em camada estacionaria, sobre a armazenabilidade de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade “carioca”: Avaliação experimental, modelagem e simulação**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1997. 229p. (Tese)
- CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; DANTAS, L. A. **Software Aplicado a Simulação de Secagem (SASG)** - Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas – Universidade Federal da Paraíba, 1989.
- CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; BRAGA, M. E. D. **Simulação de secagem do milho branco BR-451 em secador de camada estacionária**. Campina Grande – PB, Universidade Federal da Paraíba, 1993. 140p. (Tese de Professor Titular).
- CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; MARTINS, J. H.; ALMEIDA, F. A. C. Histerese em sementes de feijão mulatinho (*Phaseolus vulgaris* L.) variedade paulista. **Revista Nordestina de Armazenagem**, v.2, p.28-44, 1985.
- CHIRIFE, J.; TIMMERMANN, E. O.; IGLESIAS, H. A.; BOQUET, R. Some features of the parameter k of the GAB equation as applied to sorption isotherms of selected food materials. **Journal of Food Engineering**, v.15, p.75-82, 1992.
- CHRIST, D. **Curvas de umidade de equilíbrio higroscópico e de secagem da canola (*Brassica napus* L. variedade, oleifera) e efeito da temperatura e da umidade**

- relativa do ar de secagem sobre a qualidade das sementes.** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1996. 50p. (Dissertação)
- CORRÊA, P. C.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; STRINGHETA P. C. Estudo do fenômeno de adsorção de água e seleção de modelos matemáticos para representar a higroscopicidade do café solúvel. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.2, n.1, p.19-25, 2000.
- CORRÊA, P. C.; MARTINS, J. H.; CHRIST, D. Thin layer drying rate and loss of viability modeling for rapeseed (canola). **Journal Agricultural Engineering Research**, v.74, p.33-39, 1999.
- COUTO, S. M.; MAGALHÃES, A. C. QUEIROZ, D.M. Massa específica aparente e real e porosidade de grãos de café em função do teor de umidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.1, p.61-68, 1999.
- CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. Oxford: Clarendon Press, Ed. 2ª. 1975, 414p.
- DENISIENIA, E.; GINER, S. A. Pressure drop through wheat as affected by air velocity, moisture content and fines. **Journal Agricultural Engineering Research**, v.63, p.73-86, 1996.
- DIAS, M. C.; MARQUES, W. M.; BORGES, S. V.; MANCINI, M.C. **Efeito da secagem em leito de jorro bidimensional sobre as propriedades físicas e tecnológicas do feijão preto (*phaseolus vulgaris*, L).** Ciência e Tecnologia de Alimentos, v.20 n°3, 2000.
- DUARTE, M. E. M.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; ALMEIDA, F. A. C. Características físicas de sementes. In: DUARTE, M. E. M.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; ALMEIDA, F. A. C. **Tecnologia de armazenamento em sementes.** Campina Grande, Área de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas da Universidade Federal de Campina Grande, 2006. 402p.
- FARIAS, R. P. **Simulação da secagem de produtos biológicos em secador de fluxo cruzado.** Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2003. 69p. (Dissertação)
- FIGUEIREDO, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos.** João Pessoa: Editora Universitária /UFPB, 2004. 229p.

- FORTES, M. **A non-equilibrium thermodynamics approach to transport phenomena in capillary-porous media with special reference to drying of grains and foods.** West Lafayette, Ind. Purdue University, 1978. 172p. (Tese).
- FORTES, M.; OKOS, M. R. A non-equilibrium thermodynamics approach to transport phenomena in capillary porous media. **Transactions of the ASAE**, v.24, n.3, p.756-760, 1981a.
- FORTES, M.; OKOS, M. R. Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains. In: **Advances in Drying**. ed. Arum S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corporation. Washington. v.1, p.119-154, 1980.
- FORTES, M.; OKOS, M. R. Non-equilibrium thermodynamics approach to heat and mass transfer in corn kernels. **Transactions of the ASAE**, v.24, n.3, p.761-769, 1981b.
- FRANCESCHINI, A. S.; CORRÊA, P. C.; RAMOS, M. G. Determinação de algumas propriedades físicas de milho, híbrido BR-201. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.21, n.1, 2, p.22-27, 1996.
- GOUVEIA, J. P. G.; MOURA, R. S. F.; ALMEIDA, F. A. C.; OLIVEIRA, A. M. V.; SILVA, M. M. Avaliação da cinética de secagem de caju mediante um planejamento experimental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.3, 471-474, 2002.
- HUTCHINSON, D.; OTTEN, L. Thin-layer air drying of soybeans and white beans. **Journal Food Technology**, v.18, p.507-522, 1983.
- IBGE - Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**, Rio de Janeiro: v.6, n.12, 1994; v.7, n.12, 1995; v.8, n.12, 1996; v.9, n.12, 1997; v.10, n.12, 1998; v.11, n.12, 1999; v.12, n.12, p.65-70, 2000; v.13, n.12, 2001.
- IGLESIAS, H. A.; CHIRIFE, J. Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food materials. **Journal of Food Technology**, v.11, p.910-917, 1976a.
- INCROPERA, F. P.; de WITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e massa.** Rio de Janeiro, Ed. Guanabara – Koogan. 1992.
- JAYAS, D. S.; CENKOWSKI, S.; STANISLAW P.; *et al.* Review of thin-layer drying and wetting equations. **Drying Technology**, v.9, n.3, p.551-588, 1991.
- KEEY, R. B. **Drying of Loose and Particulate Materials.** New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1991. 504p.

- JUMAH, R. Y.; MUJUMDAR, A. S.; RAGHAVAN, G. S. V. A mathematical model for constant and intermittent batch drying of grains in a novel rotating jet spouted bed. **Drying Technology**, v.14, n.3 e 4, p.765-802, 1996.
- LEITE, J. C. A.; SOUZA, R. F.; SILVA, A. S.; *et al.* Simulação de secagem de milho (*Zea mays* L.) utilizando o modelo matemático de Thompson. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**. v.5, n.2. 2005.
- LI, H.; MOREY, R. V. Thin-layer drying of yellow dent corn. **Transactions of the ASAE**, v.27, n.2, p.581-585, 1984.
- LIMA, A. G. B. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de banana**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1999. 244p. (Tese)
- LUIKOV, A. V. **Heat and mass transfer in capillary-porous bodies**. Oxford: Pergamon Press, 1966, 523p.
- LUIKOV, A. V.; MIKHAILOV, Y. A. **Theory of energy and mass transfer**. Oxford: Pergamon Press, 1965, 392p.
- MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. 1995. 424p.
- MARTINS, J. H. **Simulação de secagem de milho em camada estacionária**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1982. 96p. (Dissertação).
- MARTINS, P. M. **Influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem no teor e da composição química do óleo essencial de capim-limão (*cymbopogon citratus* (D.C.) STAPF)**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000, 77p. (Dissertação).
- MENKOV, N. D. Moisture sorption isotherms of lentil seeds at several temperatures. **Journal Agricultural Engineering Research**, v.44, p.205-211, 2000.
- MISRA, M. K.; BROOKER, D. B. Thin-layer drying and rewetting equations for shelled yellow corn, **Transactions of the ASAE**, v.23, p.1254-1260, 1980.
- MOHSENIN, N. N. **Physical proprieties of plant and animal materials**. New York, Gordon and Breach Science Publishers, 1970, 734p.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. United States of America: John Wiley and Sons, 4^a ed. 1997. 704p.

- MORAES, J. M. de. **Determinação de parâmetros básicos de feijão carioguinha necessários ao modelamento matemático de secagem em camada espessa.** Campina Grande – PB, Universidade Federal da Paraíba, 1991, 70p. (Dissertação)
- MOREY, R. V.; CLOUD, H. A.; GUSTAFSON, R. J.; PETERSEN, D. W. Evaluation of the feasibility of solar energy grain drying. **Transactions of the ASAE**, v.22, n.2, p.409-417, 1979.
- NOVAES, T. L. C. C. **Simulação numérica de secagem de casulo do bicho-da-seda em secador de leito fixo.** Campina Grande – PB, Universidade Federal de Campina Grande, 2005, 65p. (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica.)
- OTHMER, D. F. **Correlating vapor pressure and latent heat data. Industrial and Engineering Chemistry.** v.32, n.6, p. 841-846, 1940.
- PAGE, C. **Factors influencing the maximum rate of drying shelled corn in layers.** M.S. Thesis, Department of Agricultural Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, 1949.
- PAPAS, G.; RAO, V. N. M. Sorption isotherms of cowpeas from 25 °C to 70 °C. **Transactions of the ASAE**, v.30, n.5, p.1478-1483, 1987.
- PARTI, M. A theoretical model for thin-layer grain drying. **Drying Technology**, v.8, n.1, p.101-122, 1990.
- PARTI, M. Selection of mathematical models for drying grain thin-layers. **Journal Agricultural Engineering Research**, v.54, p.339-352, 1993.
- PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow.** Hemisphere Publishing Corporation, 1980. 197p.
- PRADO, M. E. T. **Secagem de tâmaras (Phoenix dactylifera L.) para obtenção de tâmara passa.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1998. 151p. (Tese)
- PROVENZA, FRANCISCO. **Projeto de máquinas.** São Paulo: Escola Pro-Tec. 1985, 230p.
- QUEIROZ, D. M.; PEREIRA, J. A. M.; MELO, E.C. **Modelos matemáticos de simulação de secagem de grãos.** Viçosa. Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 1987, 55p.
- QUEIROZ, D. M.; PEREIRA, J. A. M.; MELO, E.C. **Práticas de simulação de secagem em calculadoras programáveis.** Viçosa. Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 1982, 83p.

- RADAJEWSKI, W.; JENSEN, T.; ABAWI, G.Y.; *et al.* Drying rate and damage to navy beans. **Transactions of the ASAE**, v.35, n.2, p.583-590, 1992.
- RODRIGUES, M. E. de A.; ALMEIDA, F. de A. C.; GOUVEIA, J. P. G.; SILVA, M. M. Avaliação da temperatura e da velocidade do ar na secagem de goiaba. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.4, n.2, p.141-147, 2002.
- ROSSI, S. J. **Psicrometria**. João Pessoa: FUNAPE, 1987. 60p.
- ROSSI, S. J.; ROA, G. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural**. São Paulo: Publicação ACIESP n.º 22, 1980. 295p.
- SACILIK, K. Resistance of bulk poppy seeds to airflow. **Biosystems Engineering**, v.89, n.4, p.435-443, 2004.
- SILVA, J.de S. **Pré-processamento de produtos agrícolas**. Juiz de Fora: Instituto Maria, 1995. 500p.
- SILVA, P. H. S. da; BLEICHER, E.; CARNEIRO, J. da S. **Manejo integrado da mosca branca (*Bemisia argentifolii* Bellows & Perring) em feijão caupi**. Teresina: EMBRAPA – Centro de Pesquisa Agropecuária do Meio-Norte, 1999a. 18p. (Circular Técnica n.º 24)
- SILVA, S. M. de S. e; FREIRE FILHO, F. R.; NOGUEIRA, M. do S. da R **Composição química e protéica de sementes de oito genótipos de feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L) Walp.)**. Teresina: EMBRAPA - Centro de Pesquisa Agropecuária do Meio-Norte, 1999b. 3p. (Comunicado Técnico n.º 105)
- SINICIO, R.; MUIR, W. E.; JAYAS, D. S.; CENKOWSKI, S. Thin-layer drying and wetting of wheat. **Post harvest Biology and Technology**, v.5, p.261-275, 1995.
- SOARES, J. B. **Curvas de secagem em camada fina e propriedades físicas de soja (*Glycine max* L.)**. Viçosa – MG, Universidade Federal de Viçosa, 1986, 91p. (Dissertação).
- SOUZA, C. M. A.; QUEIROZ, D. M.; LACERDA FILHO, A. F. Simulação do processo de secagem de sementes de milho em camada fixa. **Scientia Agrícola** v.59, n.4, p.653-660, 2002.
- SRIVASTAVA, V. K.; JOHN, J. Deep bed grain drying modeling. **Energy Conversion and Management**, v.43, p.1689-1708, 2002.

- SUN, Y.; PANTELIDES, C.C.; CHALABI, Z.S. Mathematical modeling and simulation of near-ambient grain drying. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.13, p.243-271, 1995.
- TAGAWA, A.; KITAMURA, Y.; MURATA, S. Thin layer drying characteristics of adzuki beans. **Transactions of the ASAE**, v.39, n.2, p.605-609, 1996.
- TAIWO, K.A.; AKANBI, C.T.; AJIBOLA, O.O. Thermal properties of ground and hydrated cowpea. **Journal of Food Engineering**, v.29, p.249-256, 1996.
- THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G.H. Mathematical simulation of corn drying – A new model. **Transactions of the ASAE**, v.11, n.4, p.582-586, 1968.
- TIMMERMANN, E. O.; CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H. A. Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters? **Journal of Food Engineering**, v.48, p.19-31, 2001.
- VIEIRA, R. F.; VIEIRA, C.; CALDAS, M. T. Comportamento do feijão-fradinho na primavera-verão na zona da mata de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.7, p.1359-1365, 2000.
- WANG, J. J. Mathematical modeling of the drying process in a fixed-bed dryer. **Numerical Heat Transfer**, v.24, p.229-241, 1993.
- WIKIPÉDIA. **Desenvolvido pela Wikimedia Foundation**. Apresenta conteúdo enciclopédico. Disponível em:
<<http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Elips%C3%B3ide&oldid=866472>>. Acesso em: 9 Out 2005.
- WU, B.; YANG, W.; JIA, C. A three-dimensional numerical simulation of transient heat and mass transfer inside a single rice kernel during the drying process. **Biosystems Engineering**, v.87, n.2, p.191-200, 2004.
- YOKOYAMA, Lúcia P., BANNO, Kossei, KLUTHCOUSKI, João. Aspectos socioeconômicos da cultura. In: ARAÚJO, Ricardo, S., RAVA, Carlos A., STONE, Luís F., *et al.* **Cultura do Feijoeiro Comum no Brasil**. Piracicaba: POTAFOS, 1996. 786p.

ANEXOS

ANEXO 1 – Valores do volume e da massa específica real do feijão-macáçar com teor médio de água de 65 %, base úmida, encontrados pelo método do deslocamento de líquido.

Repetições	P ₁ (kg)	P ₂ (kg)	P ₃ (kg)	P ₄ (kg)	ρ_l (kg/m ³)	V (m ³)	ρ_p (kg/m ³)
1	0,000413	0,02023	0,02045	0,00022	630	3,492E-07	1182,109
2	0,000377	0,02015	0,02036	0,00021	630	3,333E-07	1131,600
3	0,000383	0,02008	0,02029	0,00021	630	3,333E-07	1149,600
4	0,000419	0,02002	0,02024	0,00022	630	3,492E-07	1198,718
5	0,000385	0,01994	0,02016	0,00022	630	3,492E-07	1101,068
6	0,000471	0,01987	0,02015	0,00028	630	4,444E-07	1059,750
7	0,000402	0,01981	0,02004	0,00023	630	3,651E-07	1100,309
8	0,000527	0,01974	0,02006	0,00032	630	5,079E-07	1038,319
9	0,000471	0,01967	0,01994	0,00027	630	4,286E-07	1098,300
10	0,000349	0,01961	0,0198	0,00019	630	3,016E-07	1158,537
11	0,000431	0,01954	0,01977	0,00023	630	3,651E-07	1180,017
12	0,000447	0,01948	0,01973	0,00025	630	3,968E-07	1127,196
13	0,000462	0,0194	0,01965	0,00025	630	3,968E-07	1163,484
14	0,000391	0,01933	0,01956	0,00023	630	3,651E-07	1071,548
15	0,000439	0,01927	0,01952	0,00025	630	3,968E-07	1105,776
16	0,00047	0,01921	0,01946	0,00025	630	3,968E-07	1183,392
17	0,000404	0,01914	0,01938	0,00024	630	3,810E-07	1060,238
18	0,000382	0,01907	0,01929	0,00022	630	3,492E-07	1093,623
19	0,000397	0,01901	0,01926	0,00025	630	3,968E-07	1000,944
20	0,00039	0,01896	0,01916	0,0002	630	3,175E-07	1227,240
21	0,000472	0,01889	0,01918	0,00029	630	4,603E-07	1025,379
22	0,000328	0,01882	0,01901	0,00019	630	3,016E-07	1086,584
23	0,000492	0,01876	0,01903	0,00027	630	4,286E-07	1148,700
24	0,000374	0,01868	0,01889	0,00021	630	3,333E-07	1122,000
25	0,000328	0,01861	0,01878	0,00017	630	2,698E-07	1214,788
26	0,000407	0,01856	0,01878	0,00022	630	3,492E-07	1166,645
27	0,000345	0,0185	0,01869	0,00019	630	3,016E-07	1143,947
28	0,000452	0,01845	0,01871	0,00026	630	4,127E-07	1094,262
29	0,000335	0,01839	0,01857	0,00018	630	2,857E-07	1172,500
30	0,00041	0,01833	0,01856	0,00023	630	3,651E-07	1122,770

P₁ = Massa do grão;

P₂ = Massa do Becker mais o peso do líquido;

P₃ = Massa do Becker, mais o peso do líquido, mais o peso do grão submerso;

P₄ = P₃ – P₂;

Volume do grão = P₄/ massa específica do líquido.

ANEXO 2 – Valores do volume e da massa específica real do feijão-macáçar com teor médio de água de 40 %, base úmida, encontrados pelo método do deslocamento de líquido.

Repetições	P ₁ (kg)	P ₂ (kg)	P ₃ (kg)	P ₄ (kg)	ρ_l (kg/m ³)	V (m ³)	ρ_p (kg/m ³)
1	0,000221	0,020710	0,020821	0,000111	630	1,765E-07	1254,335
2	0,000261	0,020673	0,020809	0,000137	630	2,168E-07	1201,889
3	0,000253	0,020636	0,020768	0,000132	630	2,098E-07	1205,197
4	0,000273	0,020607	0,020757	0,000150	630	2,387E-07	1141,875
5	0,000302	0,020568	0,020768	0,000199	630	3,160E-07	955,284
6	0,000227	0,020533	0,020653	0,000120	630	1,902E-07	1195,843
7	0,000265	0,020492	0,020656	0,000164	630	2,606E-07	1015,981
8	0,000270	0,020459	0,020606	0,000147	630	2,335E-07	1154,215
9	0,000255	0,020422	0,020564	0,000142	630	2,249E-07	1134,178
10	0,000304	0,020378	0,020544	0,000166	630	2,641E-07	1152,097
11	0,000261	0,020339	0,020477	0,000138	630	2,184E-07	1194,985
12	0,000264	0,020300	0,020438	0,000137	630	2,183E-07	1207,309
13	0,000270	0,020269	0,020426	0,000157	630	2,492E-07	1083,841
14	0,000267	0,020239	0,020391	0,000152	630	2,417E-07	1102,397
15	0,000243	0,020210	0,020353	0,000142	630	2,257E-07	1076,582
16	0,000292	0,020179	0,020331	0,000152	630	2,408E-07	1211,826
17	0,000262	0,020148	0,020286	0,000138	630	2,192E-07	1195,677
18	0,000248	0,020118	0,020247	0,000130	630	2,057E-07	1207,014
19	0,000252	0,020089	0,020217	0,000129	630	2,044E-07	1230,163
20	0,000300	0,020554	0,020710	0,000156	630	2,483E-07	1206,426
21	0,000229	0,020498	0,020619	0,000122	630	1,930E-07	1183,840
22	0,000276	0,020461	0,020611	0,000150	630	2,387E-07	1154,023
23	0,000188	0,020424	0,020532	0,000108	630	1,717E-07	1096,969
24	0,000254	0,020396	0,020527	0,000131	630	2,076E-07	1224,358
25	0,000304	0,020359	0,020529	0,000171	630	2,710E-07	1121,599
26	0,000239	0,020325	0,020447	0,000122	630	1,944E-07	1228,114
27	0,000318	0,020294	0,020457	0,000162	630	2,578E-07	1234,009
28	0,000324	0,020243	0,020424	0,000180	630	2,863E-07	1131,835
29	0,000229	0,020214	0,020346	0,000132	630	2,100E-07	1091,905
30	0,000247	0,020181	0,020321	0,000140	630	2,227E-07	1109,572

P₁ = Massa do grão;

P₂ = Massa do Becker mais o peso do líquido;

P₃ = Massa do Becker, mais o peso do líquido, mais o peso do grão submerso;

P₄ = P₃ – P₂;

Volume do grão = P₄/ massa específica do líquido.

ANEXO 3 – Valores do volume e da massa específica real do feijão-macáçar com teor médio de água de 20 %, base úmida, encontrados pelo método do deslocamento de líquido.

Repetições	P ₁ (kg)	P ₂ (kg)	P ₃ (kg)	P ₄ (kg)	ρ _l (kg/m ³)	V (m ³)	ρ _p (kg/m ³)
1	0,000302	0,02008	0,020254	0,000174	630	2,760E-07	1092,990
2	0,000299	0,019886	0,020058	0,000172	630	2,737E-07	1092,268
3	0,000256	0,019832	0,019976	0,000144	630	2,290E-07	1117,672
4	0,000294	0,019793	0,01996	0,000167	630	2,654E-07	1108,152
5	0,00025	0,019753	0,019881	0,000128	630	2,027E-07	1231,879
6	0,000252	0,01971	0,019853	0,000143	630	2,275E-07	1109,644
7	0,000257	0,019671	0,019814	0,000143	630	2,275E-07	1129,867
8	0,000269	0,019642	0,019808	0,000166	630	2,640E-07	1020,577
9	0,000351	0,01961	0,019822	0,000211	630	3,352E-07	1047,912
10	0,000265	0,019795	0,019936	0,000141	630	2,244E-07	1182,030
11	0,000205	0,019758	0,019867	0,00011	630	1,743E-07	1178,525
12	0,000319	0,019726	0,019909	0,000183	630	2,900E-07	1100,345
13	0,00029	0,01969	0,019844	0,000153	630	2,432E-07	1192,970
14	0,00028	0,019659	0,019821	0,000162	630	2,578E-07	1084,267
15	0,000251	0,019626	0,019763	0,000137	630	2,168E-07	1158,075
16	0,000229	0,019593	0,019734	0,000141	630	2,238E-07	1021,851
17	0,00027	0,019999	0,020153	0,000153	630	2,433E-07	1107,534
18	0,000275	0,019966	0,020111	0,000145	630	2,297E-07	1198,176
19	0,000244	0,019929	0,020068	0,000139	630	2,202E-07	1106,929
20	0,000289	0,019896	0,020072	0,000176	630	2,789E-07	1036,614
21	0,000276	0,019867	0,020006	0,000139	630	2,200E-07	1253,182
22	0,000238	0,019808	0,019848	3,92E-05	630	6,222E-08	3829,821
23	0,000302	0,019773	0,019849	7,61E-05	630	1,208E-07	2496,820
24	0,000281	0,019742	0,019901	0,00016	630	2,532E-07	1109,116
25	0,00026	0,019712	0,019858	0,000146	630	2,319E-07	1122,444
26	0,000284	0,019659	0,019822	0,000163	630	2,589E-07	1097,382
27	0,000267	0,019628	0,01977	0,000142	630	2,256E-07	1184,187
28	0,000299	0,019602	0,019787	0,000185	630	2,930E-07	1021,788
29	0,000282	0,019568	0,019734	0,000167	630	2,646E-07	1066,125
30	0,00023	0,01953	0,019659	0,000129	630	2,048E-07	1125,209

P₁ = Massa do grão;

P₂ = Massa do Becker mais o peso do líquido;

P₃ = Massa do Becker, mais o peso do líquido, mais o peso do grão submerso;

P₄ = P₃ – P₂;

Volume do grão = P₄/ massa específica do líquido.

ANEXO 4 – Valores da área superficial de grãos de feijão-macáçar com teor médio de água de 65 %, base úmida, em função das medidas geométricas de seus três eixos.

Repetições	a (m)	b (m)	c (m)	P	S (m ²)
1	0,00573	0,00331	0,00356	1,6075	0,000218
2	0,005435	0,00385	0,00393	1,6075	0,000242
3	0,00652	0,00358	0,00382	1,6075	0,000264
4	0,005705	0,00326	0,00339	1,6075	0,000209
5	0,00653	0,00368	0,00362	1,6075	0,00026
6	0,00608	0,00337	0,00346	1,6075	0,000227
7	0,006745	0,00376	0,00356	1,6075	0,000268
8	0,00518	0,00381	0,00342	1,6075	0,000213
9	0,00589	0,00325	0,00359	1,6075	0,000222
10	0,005975	0,00316	0,00332	1,6075	0,00021
11	0,00558	0,00368	0,00333	1,6075	0,000218
12	0,006055	0,00371	0,00386	1,6075	0,000255
13	0,006645	0,00361	0,00340	1,6075	0,000252
14	0,00547	0,00348	0,00302	1,6075	0,000196
15	0,005865	0,00381	0,00382	1,6075	0,000251
16	0,00607	0,00384	0,00395	1,6075	0,000265
17	0,005385	0,00366	0,00351	1,6075	0,000218
18	0,00569	0,00347	0,00335	1,6075	0,000215
19	0,005635	0,00375	0,00367	1,6075	0,000235
20	0,00574	0,00383	0,00386	1,6075	0,000249
21	0,005905	0,00329	0,00314	1,6075	0,000207
22	0,00547	0,00324	0,00329	1,6075	0,000197
23	0,00564	0,00357	0,00328	1,6075	0,000214
24	0,00539	0,00303	0,00348	1,6075	0,000195
25	0,00634	0,00381	0,00351	1,6075	0,000255
26	0,00535	0,00327	0,00351	1,6075	0,000203
27	0,00608	0,00355	0,00352	1,6075	0,000236
28	0,005245	0,00358	0,00327	1,6075	0,000202
29	0,00555	0,00321	0,00363	1,6075	0,000211
30	0,006385	0,00340	0,00332	1,6075	0,000232

ANEXO 5 - Valores da área superficial de grãos de feijão-macáçar com teor médio de água de 40 %, base úmida, em função das medidas geométricas de seus três eixos.

Repetições	a (m)	b (m)	c (m)	P	S (m ²)
1	0,0042	0,0037	0,00263	1,6075	0,000155
2	0,0048	0,00402	0,00261	1,6075	0,00018
3	0,0038	0,00371	0,00264	1,6075	0,000143
4	0,0049	0,00403	0,00256	1,6075	0,000183
5	0,0047	0,00351	0,00259	1,6075	0,000161
6	0,0044	0,00381	0,00313	1,6075	0,00018
7	0,0049	0,00436	0,00305	1,6075	0,000211
8	0,0048	0,00384	0,00246	1,6075	0,00017
9	0,0049	0,00415	0,00281	1,6075	0,000194
10	0,0046	0,00374	0,00274	1,6075	0,00017
11	0,0042	0,00375	0,00276	1,6075	0,00016
12	0,0046	0,00410	0,00275	1,6075	0,000183
13	0,0047	0,00386	0,00227	1,6075	0,000163
14	0,0049	0,00374	0,00268	1,6075	0,000177
15	0,0052	0,00382	0,00275	1,6075	0,000192
16	0,0047	0,00388	0,00245	1,6075	0,00017
17	0,0047	0,00399	0,00237	1,6075	0,000168
18	0,0048	0,00428	0,00283	1,6075	0,000199
19	0,0047	0,00391	0,00261	1,6075	0,000175
20	0,0046	0,00361	0,00234	1,6075	0,000154
21	0,0053	0,00387	0,00289	1,6075	0,0002
22	0,0049	0,00349	0,00253	1,6075	0,000164
23	0,0049	0,00412	0,0026	1,6075	0,000187
24	0,0049	0,00383	0,00223	1,6075	0,000164
25	0,0046	0,00398	0,00262	1,6075	0,000175
26	0,0049	0,00369	0,00252	1,6075	0,000171
27	0,0045	0,00418	0,00276	1,6075	0,000182
28	0,0050	0,00373	0,00248	1,6075	0,000174
29	0,0047	0,00343	0,00269	1,6075	0,000161
30	0,0050	0,00405	0,00217	1,6075	0,000173

ANEXO 6 – Valores da área superficial de grãos de feijão-macáçar com teor médio de água de 20 %, base úmida, em função das medidas geométricas de seus três eixos.

Repetições	a (m)	b (m)	c (m)	P	S (m ²)
1	0,00474	0,00265	0,00374	1,6075	0,000172
2	0,005255	0,00288	0,00400	1,6075	0,000204
3	0,00495	0,00266	0,00389	1,6075	0,000183
4	0,004495	0,00309	0,00396	1,6075	0,000186
5	0,00481	0,00252	0,00364	1,6075	0,000166
6	0,00475	0,00284	0,00354	1,6075	0,000171
7	0,004465	0,00337	0,00434	1,6075	0,000207
8	0,005195	0,00273	0,00381	1,6075	0,00019
9	0,00538	0,00268	0,00382	1,6075	0,000194
10	0,004585	0,00303	0,00381	1,6075	0,000181
11	0,004725	0,00241	0,00396	1,6075	0,000171
12	0,004845	0,00296	0,00403	1,6075	0,000195
13	0,00482	0,00275	0,00386	1,6075	0,000181
14	0,004355	0,00305	0,00381	1,6075	0,000175
15	0,00516	0,00259	0,00400	1,6075	0,000191
16	0,004925	0,00306	0,00389	1,6075	0,000195
17	0,005095	0,00327	0,00388	1,6075	0,000208
18	0,004595	0,00284	0,00392	1,6075	0,000179
19	0,00521	0,00325	0,00390	1,6075	0,000212
20	0,00498	0,00339	0,00412	1,6075	0,000217
21	0,00431	0,00287	0,00377	1,6075	0,000167
22	0,00481	0,00260	0,00376	1,6075	0,000173
23	0,004405	0,00283	0,00316	1,6075	0,000149
24	0,005215	0,00316	0,00402	1,6075	0,000213
25	0,00459	0,00277	0,00383	1,6075	0,000174
26	0,004315	0,00320	0,00389	1,6075	0,000181
27	0,00415	0,00297	0,00343	1,6075	0,000155
28	0,004195	0,00243	0,00344	1,6075	0,000141
29	0,005325	0,00341	0,00378	1,6075	0,000217
30	0,0051	0,00258	0,00388	1,6075	0,000185

ANEXO 7 - Dados experimentais e preditos da massa específica aparente do feijão-macáçar em função da variação do teor de água.

Teor de água inicial do produto (% base úmida)								
21 %			40 %			65 %		
U_{bu}	$\rho_{ap} (exp)$	$\rho_{ap} (pred)$	U_{bu}	$\rho_{ap} (exp)$	$\rho_{ap} (pred)$	U_{bu}	$\rho_{ap} (exp)$	$\rho_{ap} (pred)$
21,08	786,53	786,55	38,21	747,60	747,70	64,18	658,39	653,95
16,35	777,37	778,14	30,96	737,38	736,98	57,42	644,21	644,07
13,89	773,15	771,32	23,65	722,68	721,61	49,98	641,71	630,65
11,89	764,43	764,52	18,19	703,77	707,15	44,66	618,22	619,45
9,29	750,99	754,01	11,88	688,36	687,26	38,11	605,58	603,76
7,00	745,59	743,15	9,40	679,87	678,50	31,48	574,11	585,81
6,51	741,72	740,66	8,23	676,44	674,19	24,34	572,76	564,10
5,50	733,75	735,25	5,60	662,76	664,07	20,47	546,93	551,28
						15,10	523,83	532,34
						9,67	519,78	511,81

ANEXO 8 - Dados experimentais e preditos das isotermas do feijão-macáçar conforme modelos utilizados neste trabalho.

T (°C)	U _{exp} (b,s,)	Modelos				
		Henderson-Thompson	Henderson – Thompson modificado	Chung-Pfost modificado	Halsey modificado	Oswin modificado
		U _{pred}	U _{pred}	U _{pred}	U _{pred}	U _{pred}
20	29,45	24,83	28,80	26,57	30,54	29,79
20	23,3	19,49	22,71	21,65	21,42	21,96
20	16,86	15,73	18,40	18,17	16,66	17,44
20	15,30	12,73	14,95	15,35	13,59	14,27
20	12,60	10,19	12,01	12,85	11,35	11,77
20	10,09	7,91	9,37	10,49	9,58	9,63
20	8,50	5,79	6,90	8,10	8,06	7,65
20	6,32	4,76	5,69	6,81	7,34	6,67
20	3,65	2,67	3,22	3,73	5,88	4,52
30	26,80	27,22	26,51	25,59	28,47	27,88
30	20,60	21,37	20,90	20,67	19,96	20,55
30	16,10	17,24	16,93	17,19	15,53	16,33
30	12,45	13,96	13,76	14,37	12,67	13,36
30	11,53	11,16	11,05	11,88	10,58	11,02
30	8,85	8,67	8,62	9,52	8,93	9,01
30	7,31	6,35	6,35	7,12	7,51	7,16
30	6,23	5,22	5,24	5,84	6,84	6,24
30	3,18	2,92	2,97	2,75	5,48	4,23
40	25,50	24,83	25,00	24,71	26,54	25,97
40	19,91	19,49	19,71	19,79	18,61	19,14
40	14,80	15,73	15,97	16,32	14,48	15,21
40	11,80	12,73	12,98	13,49	11,81	12,44
40	10,45	10,19	10,42	11,00	9,87	10,26
40	9,30	7,91	8,13	8,64	8,32	8,40
40	7,20	5,79	5,99	6,25	7,00	6,67
40	6,25	4,76	4,94	4,96	6,38	5,81
40	3,16	2,67	2,80	1,88	5,11	3,94
50	23,70	22,88	23,88	23,92	24,74	24,06
50	18,30	17,96	18,83	19,00	17,34	17,74
50	13,55	14,49	15,25	15,52	13,49	14,09
50	11,05	11,73	12,40	12,70	11,01	11,53
50	9,61	9,38	9,96	10,21	9,20	9,51
50	7,76	7,29	7,77	7,85	7,76	7,78
50	6,30	5,34	5,72	5,45	6,53	6,18
50	5,70	4,39	4,72	4,17	5,95	5,38
50	2,42	2,46	2,67	1,08	4,76	3,65

ANEXO 9 - Dados experimentais da secagem em camada fina do feijão-macáçar.

Experimento 1		Experimento 5		Experimento 2		Experimento 6	
t (min)	U _{bu}						
0	20,300	0	19,720	0	20,700	0	19,617
10	19,332	10	18,431	10	18,380	10	17,273
20	18,739	20	17,813	20	16,963	20	16,020
30	18,189	30	17,441	30	15,561	30	15,073
40	17,683	40	16,997	40	14,666	40	14,288
60	16,962	60	16,427	50	14,045	60	12,674
80	16,405	80	15,831	60	13,143	90	11,146
100	15,821	100	15,370	80	12,348	120	10,470
130	15,123	130	14,813	120	11,650	150	9,597
160	14,631	160	14,249	160	10,770	210	8,447
190	14,079	190	13,770	200	10,076	270	7,676
220	13,651	220	13,417	230	9,519	330	6,802
280	13,048	280	12,625	290	8,520	390	6,386
340	12,205	340	11,993	350	7,913	450	5,874
400	11,876	400	11,586	410	7,189	510	5,450
460	11,562	460	11,038	470	6,722	570	5,152
520	11,089	520	10,820	530	6,122	630	4,947
580	10,730	580	10,442	590	5,979	690	4,419
640	10,590	640	10,262	650	5,740	760	4,172
700	10,348	700	10,081	710	5,515	830	3,943
760	10,228	760	9,838	770	5,305		
820	10,005	820	9,676	830	4,965		
880	9,781	880	9,472	890	4,671		
940	9,576	940	9,288	950	4,326		
1000	9,411	1000	9,103				
1060	9,143	1060	8,939				
1120	8,977	1120	8,814				

ANEXO 10 - Dados experimentais da secagem em camada fina do feijão-macáçar.

Experimento 3		Experimento 7		Experimento 4		Experimento 8	
t (min)	U _{bu}						
0	64,05	0	65,13	00	66,10	0	66,10
20	61,78	10	60,56	10	60,61	10	56,87
30	59,55	20	57,35	20	55,40	20	50,47
40	57,41	30	54,67	30	50,89	30	44,39
50	55,17	40	51,79	40	46,23	40	39,70
60	53,26	50	49,29	50	42,09	50	34,28
80	51,22	60	47,19	60	37,68	60	27,61
100	47,28	80	43,26	70	34,05	80	21,53
120	43,83	100	39,08	90	26,87	100	17,03
150	39,79	120	36,02	120	18,98	120	12,98
180	34,98	150	30,34	150	12,66	150	10,42
210	30,30	180	26,89	210	9,84	210	8,45
270	25,36	210	23,67	270	7,81	270	6,24
330	21,00	270	18,69	330	5,46	330	5,61
390	16,85	330	14,29	390	4,81	390	5,16
450	14,31	390	12,51	450	4,39	450	4,74
510	12,67	450	11,40	510	4,08	510	4,04
570	11,75	510	10,68	570	3,85	570	3,85
630	10,82	570	10,09				
690	10,50	630	9,83				
750	10,24	690	9,53				
810	10,02	750	9,19				
870	9,66	810	8,71				

ANEXO 11 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Michigan da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial 21,5 %, base úmida, temperatura do ar de secagem de 50 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4	
	U _{exp}	U _{pred}						
0	21,50	21,50	21,50	21,50	21,50	21,50	21,50	21,50
10	20,65	20,63	20,95	20,76	21,30	20,84	21,30	21,02
20	20,45	20,00	20,65	20,17	21,00	20,29	21,20	20,38
30	20,15	19,44	20,27	19,58	20,73	19,78	20,80	19,84
40	19,60	18,92	19,68	19,14	20,36	19,30	20,45	19,43
50	19,10	18,43	19,35	18,63	19,74	18,90	20,17	19,09
60	18,55	17,97	18,94	18,23	19,28	18,43	19,70	18,63
70	18,17	17,54	18,44	17,78	18,80	18,03	19,30	18,17
80	17,66	17,13	17,95	17,42	18,50	17,66	19,00	17,83
90	17,15	16,74	17,56	17,01	18,13	17,29	18,55	17,56
100	16,76	16,37	17,00	16,70	17,76	16,94	18,06	17,22
110	16,35	16,02	16,69	16,32	17,42	16,60	17,80	16,77
120	15,98	15,68	16,37	16,04	17,16	16,28	17,53	16,51
140	15,31	15,04	15,86	15,40	16,66	15,68	17,06	15,93
160	14,68	14,46	15,12	14,84	16,02	15,12	16,31	15,36
180	14,22	13,90	14,69	14,31	15,60	14,61	15,50	14,89
200	13,76	13,40	14,14	13,83	14,70	14,13	15,08	14,39
220	13,17	12,95	13,73	13,38	14,13	13,69	14,25	13,94
240	12,61	12,51	13,21	12,95	13,62	13,28	13,66	13,57
260	12,24	12,11	12,66	12,55	13,33	12,89	13,15	13,16
280	11,87	11,74	12,26	12,20	12,70	12,53	12,78	12,82
300	11,49	11,39	12,08	11,86	12,37	12,20	12,42	12,51
330	11,06	10,91	11,87	11,36	12,05	11,74	12,13	12,06
360	10,73	10,47	11,53	10,95	11,88	11,32	11,91	11,64
390	10,51	10,08	11,17	10,56	11,55	10,95	11,57	11,27
420	10,19	9,70	10,88	10,22	11,26	10,60	11,31	10,87

ANEXO 12 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Thompson da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, temperatura do ar de secagem de 50 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4	
	U _{exp}	U _{pred}						
0	21,50	21,33	21,50	21,33	21,50	21,33	21,50	21,33
10	20,65	21,00	20,95	21,15	21,30	21,25	21,30	21,3
20	20,45	20,58	20,65	20,85	21,00	21,00	21,20	21,15
30	20,15	20,00	20,27	20,16	20,73	20,48	20,80	20,65
40	19,60	--	19,68	--	20,36	--	20,45	--
50	19,10	--	19,35	--	19,74	--	20,17	--
60	18,55	18,85	18,94	19,38	19,28	19,56	19,70	19,62
70	18,17	--	18,44	--	18,80	--	19,30	--
80	17,66	--	17,95	--	18,50	--	19,00	--
90	17,15	--	17,56	--	18,13	--	18,55	--
100	16,76	--	17,00	--	17,76	--	18,06	--
110	16,35	--	16,69	--	17,42	--	17,80	--
120	15,98	16,60	16,37	17,05	17,16	17,12	17,53	17,22
140	15,31	--	15,86	--	16,66	--	17,06	--
160	14,68	--	15,12	--	16,02	--	16,31	--
180	14,22	13,96	14,69	14,28	15,6	14,81	15,50	14,49
200	13,76	--	14,14	--	14,7	--	15,08	--
220	13,17	--	13,73	--	14,13	--	14,25	--
240	12,61	12,81	13,21	12,97	13,62	13,31	13,66	13,19
260	12,24	--	12,66	--	13,33	--	13,15	--
280	11,87	--	12,26	--	12,70	--	12,78	--
300	11,49	11,25	12,08	11,36	12,37	11,96	12,42	11,52
330	11,06	--	11,87	--	12,05	--	12,13	--
360	10,73	10,43	11,53	10,55	11,88	10,90	11,91	10,75
390	10,51	--	11,17	--	11,55	--	11,57	--
420	10,19	9,54	10,88	9,67	11,26	10,25	11,31	9,81

ANEXO 13 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Michigan da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, temperatura do ar de secagem de 60 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4	
	U _{exp}	U _{pred}						
0	21,50	21,50	21,50	21,50	21,50	21,50	21,50	21,50
10	20,62	20,53	20,90	20,67	21,10	20,76	21,25	20,99
20	20,35	19,83	20,60	20,00	20,89	20,13	21,00	20,62
30	19,80	19,20	20,10	19,32	20,40	19,52	20,74	20,08
40	19,30	18,62	19,60	18,83	20,10	18,98	20,37	19,73
50	18,70	18,09	19,20	18,25	19,60	18,50	20,06	19,37
60	18,20	17,59	18,84	17,82	19,15	18,00	19,60	18,87
70	17,74	17,12	18,41	17,31	18,72	17,56	19,20	18,46
80	17,26	16,67	17,82	16,92	18,40	17,12	18,90	18,00
90	16,59	16,25	17,41	16,46	18,00	16,70	18,60	17,60
100	16,28	15,84	16,85	16,11	17,68	16,32	18,14	17,05
110	15,96	15,45	16,47	15,69	17,31	15,97	17,86	16,71
120	15,53	15,08	16,12	15,40	17,02	15,61	17,45	16,28
140	15,00	14,39	15,65	14,69	16,30	14,93	16,80	15,57
160	14,40	13,75	14,72	14,07	15,35	14,31	16,20	14,89
180	13,76	13,16	14,28	13,49	14,70	13,74	15,40	14,37
200	13,21	12,62	13,61	12,97	14,02	13,21	14,85	13,76
220	12,79	12,11	13,14	12,45	13,18	12,74	14,12	13,19
240	12,21	11,64	12,75	11,99	12,74	12,28	13,42	12,71
260	11,67	11,20	12,23	11,55	12,17	11,83	13,09	12,26
280	11,15	10,79	11,67	11,15	11,86	11,43	12,66	11,70
300	10,86	10,40	11,19	10,77	11,40	11,07	12,19	11,31
330	10,33	9,88	10,64	10,15	11,07	10,55	11,57	10,83
360	9,78	9,40	10,25	9,78	10,73	10,11	11,13	10,35

ANEXO 14 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Thompson da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, temperatura do ar de secagem de 60 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4	
	U _{exp}	U _{pred}						
0	21,50	21,33	21,50	21,33	21,50	21,33	21,50	21,33
10	20,62	20,88	20,90	21,01	21,10	21,13	21,25	21,30
20	20,35	20,43	20,60	20,57	20,89	20,65	21,00	20,95
30	19,80	19,85	20,10	20,05	20,40	--	20,74	20,55
40	19,30	--	19,60	--	20,10	19,87	20,37	--
50	18,70	19,15	19,20	19,10	19,60	--	20,06	--
60	18,20	--	18,84	--	19,15	19,15	19,60	19,85
70	17,74	18,30	18,41	18,45	18,72	--	19,20	--
80	17,26	--	17,82	18,00	18,40	18,20	18,90	--
90	16,59	--	17,41	--	18,00	--	18,60	18,30
100	16,28	17,05	16,85	--	17,68	--	18,14	--
110	15,96	--	16,47	17,01	17,31	--	17,86	--
120	15,53	16,10	16,12	--	17,02	17,00	17,45	17,80
140	15,00	--	15,65	15,66	16,30	--	16,80	--
160	14,40	--	14,72	--	15,35	15,40	16,20	--
180	13,76	14,20	14,28	--	14,70	--	15,40	15,90
200	13,21	--	13,61	13,85	14,02	--	14,85	--
220	12,79	--	13,14	--	13,18	--	14,12	--
240	12,21	12,40	12,75	--	12,74	13,21	13,42	13,91
260	11,67	--	12,23	--	12,17	--	13,09	--
280	11,15	--	11,67	11,57	11,86	--	12,66	--
300	10,86	10,62	11,19	11,25	11,40	11,87	12,19	12,42
330	10,33	--	10,64	--	11,07	--	11,57	--
360	9,78	9,85	10,25	10,77	10,73	10,94	11,13	11,35

ANEXO 15 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Michigan da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, temperatura do ar de secagem de 70 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4	
	U _{exp}	U _{pred}						
0	21,50	21,50	21,33	21,33	21,33	21,33	21,33	21,33
10	20,52	20,46	20,84	20,67	21,01	20,72	21,33	21,42
20	20,27	19,71	20,52	20,38	20,84	20,70	21,17	21,19
30	19,69	19,29	20,03	20,00	20,35	20,04	21,01	20,85
40	18,93	18,57	19,52	19,22	20,02	19,69	20,35	20,44
50	18,50	17,98	19,05	18,63	19,52	19,32	20,02	20,00
60	17,98	17,52	18,71	18,14	19,10	18,95	19,52	19,54
70	17,53	16,91	18,37	17,76	18,67	18,57	19,19	19,09
80	17,10	16,53	17,76	17,29	18,33	18,17	18,85	18,65
90	16,56	16,13	17,37	16,70	17,98	17,78	18,50	18,22
100	16,18	15,51	16,74	16,28	17,63	17,39	18,07	17,81
110	15,74	15,24	16,38	15,75	17,28	17,01	17,72	17,42
120	15,36	14,86	15,97	15,55	16,92	16,64	17,37	17,05
140	14,81	14,22	15,17	14,68	16,20	15,95	16,74	16,37
160	13,96	13,53	14,31	13,79	15,28	15,34	16,11	15,76
180	13,18	12,90	13,56	13,19	14,62	14,81	15,28	15,23
200	12,66	12,32	13,00	12,59	13,86	14,21	14,62	14,76
220	12,09	11,76	12,29	11,89	13,08	13,51	13,86	14,21
240	11,58	11,16	11,80	11,58	12,59	13,01	13,37	13,70
260	10,87	10,50	11,28	11,03	11,99	12,63	12,59	13,07
280	10,35	10,06	10,57	10,71	11,59	12,14	12,29	12,45
300	9,72	9,65	10,31	10,07	11,24	11,71	11,79	12,06

ANEXO 16 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Thompson da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, temperatura do ar de secagem de 70 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4	
	U _{exp}	U _{pred}						
0	21,50	21,33	21,50	21,33	21,50	21,33	21,50	21,33
10	20,52	20,65	20,84	20,80	21,01	21,00	21,33	21,30
20	20,27	20,15	20,52	20,50	20,84	20,70	21,17	20,95
30	19,69	19,55	20,03	19,90	20,35	20,22	21,01	20,35
40	18,93	--	19,52	--	20,02	--	20,35	--
50	18,50	18,70	19,05	19,20	19,52	19,45	20,02	19,85
60	17,98	18,15	18,71	18,60	19,10	19,30	19,52	--
70	17,53	--	18,37	--	18,67	--	19,19	--
80	17,10	16,95	17,76	17,65	18,33	--	18,85	18,40
90	16,56	--	17,37	--	17,98	--	18,50	--
100	16,18	--	16,74	--	17,63	17,25	18,07	--
110	15,74	15,90	16,38	16,60	17,28	--	17,72	17,55
120	15,36	15,25	15,97	--	16,92	--	17,37	--
140	14,81	14,75	15,17	--	16,20	15,85	16,74	16,68
160	13,96	--	14,31	14,70	15,28	--	16,11	--
180	13,18	13,45	13,56	--	14,62	14,50	15,28	--
200	12,66	12,43	13,00	13,20	13,86	--	14,62	14,15
220	12,09	11,97	12,29	--	13,08	--	13,86	--
240	11,58	--	11,80	--	12,59	12,80	13,37	--
260	10,87	--	11,28	11,55	11,99	--	12,59	--
280	10,35	--	10,57	--	11,59	--	12,29	12,15
300	9,72	9,62	10,31	9,71	11,24	10,85	11,79	11,35

ANEXO 17 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Michigan da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, temperatura de 50 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4	
	T _{exp}	T _{pred}						
0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0
10	40,0	42,0	38,0	40,8	36,0	38,2	35,0	37,3
20	42,0	45,0	38,9	44,2	36,8	42,6	36,5	41,9
30	44,4	45,6	42,6	45,0	41,7	43,6	41,0	43,2
40	45,8	46,0	43,4	45,2	42,6	44,1	42,0	43,6
50	46,0	46,3	44,1	45,7	43,5	44,5	42,7	43,9
60	42,2	46,5	44,2	45,9	43,8	44,7	43,0	44,2
70	45,9	46,7	44,3	46,0	43,9	45,0	43,6	44,5
80	44,9	46,9	44,5	46,2	44,0	45,2	43,8	44,7
90	45,3	47,1	44,8	46,4	44,1	45,4	43,9	44,9
100	46,0	47,3	45,2	46,5	44,6	45,5	44,1	45,0
110	--	--	--	--	--	--	--	--
120	46,7	47,5	45,7	46,8	45,0	45,8	44,5	45,3
140	--	--	--	--	--	--	--	--
160	47,0	47,9	46,3	47,2	45,5	46,3	44,9	45,8
180	--	--	--	--	--	--	--	--
200	47,6	48,2	46,5	47,5	45,9	46,6	45,3	46,0
220	--	--	--	--	--	--	--	--
240	--	--	--	--	--	--	--	--
260	48,0	48,5	47,2	47,8	46,4	47,0	46,0	46,5
280	--	--	--	--	--	--	--	--
300	--	--	--	--	--	--	--	--
330	--	--	--	--	--	--	--	--
360	--	--	--	--	--	--	--	--
390	48,3	48,7	47,8	48,4	47,4	47,0	46,6	47,1
420	48,8	49,1	48,2	48,8	47,7	48,3	47,2	47,5

ANEXO 18 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Michigan da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4	
	T _{exp}	T _{pred}						
0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0
10	51,3	51,7	45,6	48,4	45,0	46,6	37,2	39,9
20	55,2	55,1	47,8	53,5	47,5	52,6	44,2	47,6
30	55,4	55,7	52,6	54,5	50,6	53,8	48,2	50,0
40	55,6	56,1	53,3	55,0	52,1	54,3	50,2	51,4
50	55,9	56,4	53,6	55,3	52,8	54,6	51,4	52,0
60	56,3	56,7	54,2	55,6	53,7	55,0	51,2	52,5
70	56,5	56,9	54,9	55,8	54,2	55,2	52,0	52,9
80	56,6	57,0	55,5	56,0	55,0	55,4	52,6	53,1
90	57,0	57,2	56,1	56,2	55,4	55,6	52,8	53,5
100	57,1	57,3	56,2	56,4	55,6	55,8	53,0	53,8
110	--	--	--	--	--	--	--	--
120	57,2	57,6	56,3	56,6	55,8	56,0	54,0	54,2
140	--	--	--	--	--	--	--	--
160	57,5	57,9	56,5	57,0	56,0	56,5	54,4	54,8
180	--	--	--	--	--	--	--	--
200	57,9	58,2	56,7	57,4	56,2	56,8	55,0	55,4
220	--	--	--	--	--	--	--	--
240	--	--	--	--	--	--	--	--
260	58,0	58,5	57,2	57,7	57,0	57,2	55,0	56,0
280	--	--	--	--	--	--	--	--
300	--	--	--	--	--	--	--	--
330	--	--	--	--	--	--	--	--
360	58,5	58,9	57,8	58,2	57,2	57,5	56,2	57,1

ANEXO 19 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Michigan da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 21,5 %, base úmida, temperatura de 70 °C e velocidade do ar de 0,5 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4	
	T _{exp}	T _{pred}						
0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
10	55,3	58,3	53,5	56,3	50,8	53,9	45,6	49,3
20	58,1	64,1	55,7	63,3	53,6	62,3	50,4	59,6
30	61,9	65,1	60,5	64,5	58,3	63,7	56,2	62,0
40	63,8	65,6	63,0	65,0	60,1	64,3	58,4	62,8
50	61,5	66,0	63,2	65,4	62,5	64,7	60,9	63,4
60	64,5	66,2	63,4	65,6	62,7	65,0	61,8	63,7
70	64,8	66,5	63,7	65,9	62,9	65,3	62,0	64,1
80	65,0	66,7	64,2	66,1	63,4	65,5	62,4	64,4
90	65,1	66,9	64,9	66,3	63,6	65,7	62,6	64,6
100	65,4	67,0	65,0	66,5	64,0	65,9	62,8	64,8
110	65,8	67,2	65,1	66,6	64,1	66,0	63,2	65,0
120	66,0	67,3	65,5	66,7	64,3	66,2	63,5	65,8
140	--	--	--	--	--	--	--	--
160	--	--	--	--	--	--	--	--
180	66,7	67,9	66,1	67,4	65,8	66,8	64,4	65,9
200	--	--	--	--	--	--	--	--
220	--	--	--	--	--	--	--	--
240	68,1	68,3	67,6	67,8	66,3	67,4	65,3	66,5
260	--	--	--	--	--	--	--	--
280	--	--	--	--	--	--	--	--
300	68,4	68,5	68,1	68,2	67,8	68,0	66,6	67,1

ANEXO 20 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Michigan da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida, temperatura do ar de secagem de 50 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2		Camada 3		t (min)	Camada 4	
	U _{exp}	U _{pred}	U _{exp}	U _{pred}	U _{exp}	U _{pred}		U _{exp}	U _{pred}
0	40,12	40,12	40,12	40,12	40,12	40,12	0	40,15	41,04
10	39,69	38,58	40,28	39,25	40,52	39,36	10	40,55	39,41
20	38,50	37,36	39,37	38,27	39,80	38,62	20	40,05	38,76
30	37,59	36,37	38,56	37,50	38,89	38,02	30	39,62	38,08
40	36,69	35,37	37,75	36,71	37,92	37,19	40	39,19	37,70
50	36,14	34,55	36,82	35,82	37,26	36,25	50	38,68	37,17
60	35,03	33,51	36,02	35,06	36,46	35,90	60	37,75	36,67
70	34,17	32,50	35,23	34,34	35,78	34,67	70	36,94	36,02
80	33,28	31,60	34,31	33,51	34,84	33,81	80	36,21	35,53
90	32,41	30,65	33,55	32,80	34,07	33,18	90	35,52	35,06
100	31,63	29,80	32,79	32,11	33,34	32,45	100	34,83	34,60
110	30,82	28,90	31,89	31,34	32,60	31,56	110	34,06	34,12
120	30,01	28,06	31,17	30,70	31,70	31,04	120	33,56	33,55
135	29,07	26,87	29,95	30,17	30,63	30,54	135	32,57	32,95
150	27,82	25,82	28,88	28,80	29,60	29,36	150	31,49	31,53
165	26,57	24,78	27,85	28,37	28,59	29,07	165	30,85	30,80
180	25,80	23,78	26,71	27,06	27,42	28,18	180	29,68	31,08
195	24,75	22,69	25,70	26,29	26,46	27,12	195	28,51	30,53
210	23,57	22,03	24,83	25,54	25,50	26,40	210	27,56	30,02
225	23,03	21,23	23,90	24,53	24,43	25,22	225	27,09	29,43
240	22,05	20,48	22,99	24,03	23,54	24,68	240	26,49	28,88
255	21,26	19,74	22,23	23,26	23,15	24,15	255	25,69	27,64
280	20,07	18,77	21,32	22,60	22,14	23,40	280	24,67	26,90
310	18,53	17,49	20,16	21,82	21,27	22,24	310	23,64	25,98
340	17,46	16,53	19,26	20,67	20,16	21,61	340	22,71	25,21
370	16,61	15,40	18,51	20,00	19,29	20,72	370	22,04	24,44
400	16,00	14,80	17,35	19,22	18,69	20,19	400	21,45	23,81
460	14,17	13,04	16,16	17,56	17,87	19,32	430	20,69	23,20
520	13,05	12,43	14,90	16,46	16,81	18,26	460	20,07	22,60
580	12,61	12,05	13,85	15,75	16,40	17,50	490	19,67	22,06
640	12,16	11,35	13,35	14,97	15,71	16,93	520	19,05	21,57
700	11,35	10,35	12,87	14,46	15,18	16,25	550	18,46	21,14
760	10,75	10,05	12,37	14,02	14,81	16,17	580	18,39	20,73
820			11,78	13,64	14,66	15,82	610	17,79	20,32
880			11,39	13,19	14,53	15,65	670	17,35	19,65
940			10,88	12,78	14,35	15,42	730	17,02	19,03
1060					14,15	15,28	790	16,71	18,53
1120					14,06	15,08	850	16,43	18,10
1240							910	16,12	17,70
1360							970	15,76	17,36
1480							1030	15,43	17,15
1600							1090	15,12	16,87
							1150	15,01	16,67
							1210	14,88	16,53
							1330	14,73	16,32
							1390	14,62	16,18
							1450	14,42	16,11
							1510	14,06	16,04

ANEXO 21 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Thompson da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida, temperatura do ar de secagem de 50 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4		
	U _{exp}	U _{pred}	U _{exp}	U _{pred}	U _{exp}	U _{pred}	t (min)	U _{exp}	U _{pred}
0	40,12	40,12	40,12	40,12	40,12	40,12	0	40,15	41,04
10	39,69	39,66	40,28	----	40,52	--	10	40,55	39,54
20	38,50	38,95	39,37	39,32	39,80	39,54	20	40,05	38,97
30	37,59	38,06	38,56	--	38,89	--	30	39,62	38,37
40	36,69	36,99	37,75	38,12	37,92	38,67	40	39,19	37,73
50	36,14	--	36,82	--	37,26	--	50	38,68	--
60	35,03	35,69	36,02	36,63	36,46	37,57	60	37,75	37,05
70	34,17	34,25	35,23	--	35,78	--	70	36,94	--
80	33,28	--	34,31	34,85	34,84	--	80	36,21	36,31
90	32,41	32,55	33,55	--	34,07	36,24	90	35,52	--
100	31,63	--	32,79	--	33,34	--	100	34,83	35,53
115	30,82	30,70	31,89	32,75	32,60	--	110	34,06	--
120	30,01	--	31,17	--	31,70	34,70	120	33,56	34,58
135	29,07	28,90	29,95	--	30,63	--	135	32,57	--
150	27,82	--	28,88	30,34	29,60	32,91	150	31,49	33,57
165	26,57	--	27,85	--	28,59	--	165	30,85	--
180	25,80	23,55	26,71	27,59	27,42	30,84	180	29,68	32,46
195	24,75	--	25,70	--	26,46	--	195	28,51	--
210	23,57	--	24,83	--	25,50	28,44	210	27,56	--
225	23,03	20,96	23,90	24,41	24,43	--	225	27,09	--
240	22,05	--	22,99	--	23,54	--	240	26,49	31,27
255	21,26	--	22,23	--	23,15	25,71	255	25,69	--
280	20,07	18,73	21,32	20,82	22,14	--	280	24,67	29,78
310	18,53	--	20,16	--	21,27	22,54	310	23,64	--
340	17,46	15,38	19,26	17,77	20,16	--	340	22,71	27,16
370	16,61	--	18,51	--	19,29	--	370	22,04	--
400	16,00	--	17,35	15,66	18,69	18,90	400	21,45	--
460	14,17	12,11	16,16	--	17,87	--	430	20,69	25,34
520	13,05	--	14,90	--	16,81	15,90	460	20,07	--
580	12,61	10,79	13,85	12,85	16,40	--	490	19,67	--
640	12,16	--	13,35	--	15,71	--	520	19,05	23,18
700	11,35	--	12,87	--	15,18	13,43	550	18,46	--
760	10,75	9,47	12,37	10,82	14,81	--	580	18,39	21,63
820			11,78	--	14,66	--	610	17,79	--
880			11,39	--	14,53	12,65	670	17,35	19,35
940			10,88	9,61	14,35	--	730	17,02	--
1060				--	14,15	--	790	16,71	--
1120				--	14,06	11,55	850	16,43	--
1240							910	16,12	17,07
1360							970	15,76	--
1480							1030	15,43	--
1600							1090	15,12	14,25
							1150	15,01	--
							1210	14,88	--
							1330	14,73	13,05
							1390	14,62	--
							1450	14,42	--
							1510	14,06	12,16

ANEXO 23 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Thompson da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida, temperatura do ar de secagem de 60 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2		Camada 3			Camada 4		
	U _{exp}	U _{pred}	U _{exp}	U _{pred}	t	U _{exp}	U _{pred}	t	U _{exp}	U _{pred}
0	40,10	40,10	40,10	40,10	0	40,10	40,10	0	40,11	40,10
5	38,85	--	39,56	--	10	39,49	39,61	10	39,88	--
10	38,64	39,28	39,02	39,49	20	38,77	38,99	20	39,46	39,27
15	37,88	--	38,42	--	25	38,34	--	30	38,73	--
20	37,11	38,20	37,73	38,67	30	37,72	38,27	40	37,89	38,20
25	36,43	--	37,23	--	35	37,29	--	50	37,22	--
30	35,73	37,03	36,67	37,69	40	35,88	37,11	60	36,65	37,03
35	35,14	--	35,94	--	45	35,27	--	70	35,75	--
40	34,29	35,69	35,57	36,61	50	34,62	--	80	34,67	35,75
45	33,67	--	34,85	--	55	34,18	--	90	33,68	--
50	32,79	--	34,34	--	60	33,79	36,63	100	32,75	--
55	32,01	--	33,82	--	65	32,91	--	105	32,37	--
60	31,35	34,21	33,31	35,38	70	32,47	--	110	32,06	--
65	30,67	--	32,80	--	75	31,89	35,67	115	31,75	--
70	30,53	32,43	32,16	33,99	80	31,36	--	120	31,36	34,32
75	30,12	--	31,65	--	85	30,85	--	130	31,15	--
80	29,56	--	31,18	--	90	30,57	34,21	140	30,52	--
85	29,13	--	30,70	--	95	30,24	--	150	29,59	32,75
90	28,56	30,84	30,26	32,48	100	29,56	--	160	29,28	--
95	27,98	--	29,82	--	105	28,89	32,47	180	27,77	31,06
100	27,38	--	29,35	--	110	28,55	--	200	27,15	--
105	27,08	28,97	28,85	30,60	115	28,05	--	220	26,05	29,18
110	26,32	--	28,37	--	120	27,76	31,20	240	25,14	--
115	25,85	--	27,93	--	135	26,64	--	260	24,00	27,11
120	25,22	26,96	27,54	28,88	150	25,43	28,80	280	23,47	--
135	23,77	--	26,36	--	165	24,33	27,18	300	22,66	24,92
150	22,08	24,73	25,15	26,74	180	23,46	25,83	330	21,52	--
165	20,62	--	24,13	--	195	22,65	--	360	20,69	22,33
180	19,42	22,06	23,05	24,36	210	21,76	24,43	390	19,85	--
195	18,32	19,32	22,18	21,69	225	20,84	--	420	19,25	19,55
210	17,14	--	21,27	--	240	20,24	22,14	450	18,08	--
225	16,34	--	20,45	--	255	19,55	--	480	17,79	16,78
240	15,63	16,32	19,74	18,73	280	18,69	20,54	510	17,33	--
255	15,01	--	19,09	--	310	17,58	--	540	16,69	--
280	13,78	13,81	18,07	--	340	16,63	17,53	570	16,31	14,98
310	12,82	--	16,94	15,61	370	15,84	--	600	15,83	--
340	12,07	--	16,32	--	400	15,25	--	660	15,55	--
370	11,44	10,39	15,22	--	430	14,78	14,94	720	14,29	13,02
400	10,27	--	14,57	--	460	14,26	--	780	14,05	--
430	9,69	9,21	13,94	12,03	490	13,87	--	840	13,64	--
460	9,49	--	13,42	--	520	13,49	--	900	13,18	12,15
490	9,20	9,10	12,97	10,63	550	13,15	--	960	13,06	--
520	--	--	12,66	--	580	12,86	13,82	1020	12,87	--
550	--	--	12,05	--	610	12,68	--	1080	12,74	--
580	--	--	11,66	--	670	12,38	--	1140	12,52	--
640	--	--	11,54	10,07	730	12,14	12,98	1260	12,41	10,59
700	--	--	11,11	9,91	790	11,77	--	1380	12,35	10,26
--	--	--	--	--	850	11,55	--	--	--	--
--	--	--	--	--	970	11,19	12,35	--	--	--

ANEXO 25 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Thompson da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida, temperatura do ar de secagem de 70 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4		
	U _{exp}	U _{pred}	U _{exp}	U _{pred}	U _{exp}	U _{pred}	t (min)	U _{exp}	U _{pred}
0	40,10	40,10	40,10	40,10	40,10	40,10	0	40,10	40,10
10	38,64	38,4	38,84	38,75	39,02	39,15	10	39,67	39,25
20	37,11	36,85	37,23	37,45	38,42	37,95	20	38,84	38,40
30	35,73	35,25	36,41	36,15	37,71	36,90	30	38,16	37,55
40	34,30	33,70	35,38	--	36,42	35,80	40	37,39	--
50	32,80	32,10	33,76	34,81	34,89	--	50	36,68	36,67
60	31,34	--	32,67	33,05	34,18	34,66	60	35,68	35,76
70	30,53	30,41	31,63	32,04	33,33	--	70	34,56	--
80	29,56	28,72	30,64	--	32,19	33,55	80	33,28	34,79
90	28,56	--	29,78	30,17	31,18	--	90	31,91	--
100	27,38	26,25	28,55	--	30,13	32,20	100	31,15	32,77
110	26,31	--	27,65	29,03	29,67	--	110	30,78	--
115	25,85	--	26,66	--	28,79	30,08	115	30,27	--
120	25,22	25,15	25,87	--	28,19	--	120	29,69	30,69
135	23,76	--	24,94	26,42	27,78	28,45	135	29,07	--
150	22,08	23,25	23,56	24,73	27,07	--	150	28,15	29,50
165	20,32	21,25	21,87	--	25,74	--	165	27,22	--
180	18,47	--	20,66	21,92	24,67	--	180	25,44	27,01
195	17,32	19,20	19,32	--	23,71	24,30	195	24,67	--
210	16,14	17,05	18,16	20,05	22,44	--	210	23,36	25,05
225	15,54	--	17,29	--	21,75	22,60	225	22,20	--
240	15,13	--	16,48	18,03	20,69	--	240	21,16	--
255	14,41	14,82	15,42	--	19,84	20,80	255	20,18	22,50
280	13,79	--	14,53	16,09	19,16	--	280	19,48	--
310	12,82	12,51	13,58	--	18,73	18,82	310	18,67	--
340	12,24	--	13,05	14,55	17,49	--	340	17,86	19,06
370	11,47	11,50	12,46	--	16,68	--	370	16,61	17,80
400	10,43	10,35	11,51	13,05	15,79	16,65	400	15,64	--
430	10,27	9,95 -	11,29	--	15,47	--	430	14,87	--
460	--		11,06	--	14,92	--	460	14,26	16,15
490	--		10,54	11,49	14,44	14,30	490	13,59	--
520	--		--		13,86	13,75	520	13,13	--
550	--		--		13,54	12,66	550	12,85	14,38
580	--		--		13,07	--	580	12,57	--
610	--		--		12,76	12,05	610	12,29	--
670	--		--				670	11,97	--
730	--		--				730	11,65	13,55
790	--		--				790	11,52	--
850							850	11,42	--
910							910	11,38	12,45
970							970	--	
1020							1020	--	

ANEXO 28 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Michigan da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 40 %, base úmida, temperatura de 50 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4	
	T _{exp}	T _{pred}						
0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30
5	--	--	--	--	--	--	--	--
10	32,4	34,1	30,0	32,2	30,0	31,2	30,0	30,5
15	--	--	--	--	--	--	--	--
20	34,9	36,3	31,5	34,2	30,2	33,2	30,0	32,3
25	--	--	--	--	--	--	--	--
30	36,5	37,3	32,6	35,1	30,6	34,0	30,0	33,4
35	--	--	--	--	--	--	--	--
40	37,1	38,0	33,9	35,7	31,7	34,7	30,2	34,0
45	--	--	--	--	--	--	--	--
50	38,2	38,7	34,2	36,3	33,4	35,0	30,5	34,4
55	--	--	--	--	--	--	--	--
60	38,8	39,3	35,6	36,7	34,5	35,4	31,8	34,7
65	--	--	--	--	--	--	--	--
70	39,3	39,8	36,7	37,0	34,9	35,8	32,6	35,0
75	--	--	--	--	--	--	--	--
80	39,75	40,2	36,9	37,5	35,4	36,0	33,8	35,2
85	--	--	--	--	--	--	--	--
90	40,25	40,7	37,1	37,8	35,8	36,3	34,1	35,4
95	--	--	--	--	--	--	--	--
100	40,8	41,0	37,7	38,1	36,0	36,5	34,6	35,6
105	--	--	--	--	--	--	--	--
110	41,2	41,5	38,0	38,5	36,6	36,8	34,9	35,7
115	--	--	--	--	--	--	--	--
120	41,6	41,8	38,2	38,7	36,9	37,0	35,0	35,9
135	--	--	--	--	--	--	--	--
150	--	--	--	--	--	--	--	--
165	--	--	--	--	--	--	--	--
180	42,8	43,5	39,0	40,1	37,2	38,0	35,2	36,6
195	--	--	--	--	--	--	--	--
210	--	--	--	--	--	--	--	--
225	--	--	--	--	--	--	--	--
240	43,4	44,6	39,85	41,1	37,7	38,7	35,7	37,1
255	--	--	--	--	--	--	--	--
280	--	--	--	--	--	--	--	--
310	44,75	45,4	40,25	41,9	38,2	39,4	36,2	37,6
340	--	--	--	--	--	--	--	--
370	--	--	--	--	--	--	--	--
400	45	45,9	41,6	42,5	39,3	39,8	36,9	37,7
460	--	--	--	--	--	--	--	--
520	45,8	46,4	43,4	44,2	39,6	40,5	37,1	38,0
580	--	--	--	--	--	--	--	--
640	--	--	--	--	--	--	--	--
700	--	--	--	--	--	--	--	--
760	47,1	47,5	44,8	45,3	40,6	41,5	37,8	38,8

ANEXO 29 - Dados experimentais e dados preditos pelos modelos de Michigan (U_{pred1}) e de Thompson (U_{pred2}) da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 64 %, base úmida, temperatura do ar de secagem de 50 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

t (min)	Camada 01			Camada 02		
	U_{exp}	U_{pred1}	U_{pred2}	U_{exp}	U_{pred1}	U_{pred2}
0	63,90	63,90	63,90	63,90	63,90	63,90
30	62,81	62,55	63,02	63,51	62,94	63,37
60	61,65	61,27	61,72	62,86	62,01	62,67
90	60,24	59,87	60,66	62,08	61,17	61,85
120	58,92	58,39	58,80	61,32	60,03	60,92
150	57,23	57,01	57,34	60,36	59,12	59,90
180	55,85	55,52	55,67	59,53	58,17	58,78
210	54,03	54,00	54,77	58,47	56,97	--
240	52,25	52,45	52,76	57,43	55,87	57,57
270	50,91	50,91	50,47	56,37	54,73	56,26
300	49,68	49,06	49,21	55,25	53,68	54,85
330	47,98	47,97	47,85	54,11	52,54	--
360	46,44	45,80	44,81	53,12	51,39	53,34
390	43,48	44,29	43,12	52,16	50,22	51,69
420	41,40	43,05	41,33	51,09	49,19	--
450	39,97	40,90	39,36	50,00	48,08	49,92
480	37,91	39,83	37,23	48,72	46,53	48,02
510	36,52	38,80	--	47,48	45,89	--
540	34,68	36,67	34,90	46,22	44,87	45,98
570	32,65	34,65	32,39	45,30	44,10	--
600	30,14	33,63	--	44,06	42,30	43,76
630	28,19	31,60	29,60	42,52	41,54	--
660	26,63	31,41	--	40,95	40,81	41,38
690	25,10	29,58	26,58	39,43	39,32	--
720	23,52	28,67	--	38,04	38,35	38,80
750	21,97	26,90	23,28	36,74	37,50	--
780	20,48	25,87	--	35,46	36,51	36,02
810	19,06	24,33	19,55	34,12	34,90	--
840	17,58	23,18	--	32,82	33,44	33,02
870	16,30	21,81	17,83	31,46	32,48	--
900	14,86	20,57	--	30,02	31,67	29,78

930	13,64	19,74	15,47	28,24	30,60	--
960	12,40	18,10	--	26,69	29,18	27,60
990	11,95	17,29	12,74	25,82	28,34	--
1020	11,52	15,75	--	24,56	27,64	26,20
1050	11,23	14,97	--	22,78	26,01	--
1080	10,02	14,31	10,91	21,95	25,15	23,86
1110				20,22	24,37	--
1140				19,25	23,95	21,36
1170				18,12	22,56	--
1200				16,33	22,24	18,23
1230				15,03	21,57	--
1260				13,04	20,92	15,82
1290				12,15	20,12	--
1320				10,75	19,58	14,27
1350				10,05	18,53	12,55
1380						

ANEXO 30 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Michigan da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 65 %, base úmida, temperatura do ar de secagem de 60 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2		t (min)	Camada 3		t (min)	Camada 4	
	U _{exp}	U _{pred}	U _{exp}	U _{pred}		U _{exp}	U _{pred}		U _{exp}	U _{pred}
0	65,28	65,28	65,28	65,28	0	65,28	65,28	0	65,28	65,28
30	64,16	63,64	65,06	64,48	30	65,45	64,79	30	65,62	64,88
60	62,67	61,54	64,25	63,50	60	65,02	64,18	60	65,37	64,40
90	61,26	59,30	63,45	62,46	90	64,53	63,73	90	65,02	64,14
120	59,69	56,90	62,57	61,39	120	64,02	63,30	120	64,62	63,91
150	57,92	54,55	61,74	60,24	150	63,45	62,78	150	64,21	63,53
180	55,98	52,06	60,93	59,02	180	62,92	62,29	180	63,74	63,36
210	53,94	49,52	60,09	57,81	210	62,36	61,74	210	63,26	63,06
240	51,05	46,88	59,06	56,52	240	61,69	61,12	270	62,95	62,25
270	48,04	44,44	57,72	55,87	270	60,82	60,36	330	62,40	61,12
300	45,62	42,30	56,84	54,04	300	60,35	59,74	390	61,63	59,81
330	43,02	38,84	56,05	52,74	330	59,75	58,88	450	61,17	58,35
360	40,40	37,17	55,31	51,41	360	59,12	58,12	510	60,23	57,03
390	37,55	33,97	54,01	49,80	390	58,42	57,30	570	59,05	55,63
420	34,58	32,57	52,84	48,93	420	57,95	56,41	630	58,04	54,34
450	32,02	29,88	51,52	47,42	450	56,94	55,61	690	56,20	53,01
480	28,88	28,32	50,44	46,10	480	56,19	54,81	750	54,50	51,64
510	26,00	27,43	49,22	44,78	510	55,41	54,09	810	53,13	50,67
540	23,51	24,76	47,84	43,44	540	54,65	53,07	870	51,09	49,72
570	20,69	23,31	46,69	42,36	570	53,78	52,24	930	49,26	48,73
600	18,36	21,91	45,32	41,31	600	52,84	51,41	990	46,67	47,70
630	15,75	19,89	44,11	39,50	630	51,94	50,62	1050	44,28	46,65
660	13,40	18,19	42,73	37,77	660	50,84	49,87	1110	41,74	45,59
690	12,03	16,70	40,85	36,95	690	49,63	48,94	1170	38,68	44,51
750	9,15	13,29	37,23	36,06	720	48,75	48,20	1230	36,37	43,46
780			35,57	33,64	750	47,59	47,51	1290	33,01	42,43
810			33,31	32,75	780	46,48	46,61	1350	31,24	41,43
840			32,06	31,27	810	45,38	45,86	1410	28,84	40,51
870			30,21	30,36	840	44,61	45,11	1470	27,16	39,17
900			28,21	29,58	870	44,11	44,38	1530	25,02	38,71
930			26,03	28,32	900	42,91	43,66	1590	23,11	37,93
960			24,33	26,58	930	41,89	42,95	1650	21,16	37,14

990			22,48	25,60	960	40,78	42,26	1710	19,54	36,43
1020			21,20	24,30	990	39,22	41,59	1770	17,75	35,77
1050			19,26	22,60	1110	34,72	39,09	1830	16,35	35,17
1080			17,46	22,36	1170	31,59	37,95	1890	15,15	34,60
1110			15,51	21,75	1230	28,69	36,67	1950	14,35	34,08
1170			12,72	19,42	1290	25,13	35,50	2010	13,98	33,38
1230			10,25	17,70	1350	20,41	34,36	2070	13,63	33,11
					1410	16,34	33,29	2130	13,23	31,70
					1470	12,66	32,30	2190	--	--
					1530	11,00	31,37	2250		--
						--	--	--		--

ANEXO 31 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Thompson da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 65 %, base úmida, temperatura do ar de secagem de 60 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2		t (min)	Camada 3		t (min)	Camada 4	
	U _{exp}	U _{pred}	U _{exp}	U _{pred}		U _{exp}	U _{pred}		U _{exp}	U _{pred}
0	65,28	65,28	65,28	65,28	0	65,28	65,28	0	65,28	65,28
30	64,16	64,29	65,06	64,81	30	65,45	64,94	30	65,62	65,02
60	62,67	62,84	64,25	64,11	60	65,02	64,48	60	65,37	64,63
90	61,26	61,10	63,45	63,29	90	64,53	63,88	90	65,02	64,22
120	59,69	59,10	62,57	62,36	120	64,02	63,24	120	64,62	63,69
150	57,92	56,86	61,74	61,33	150	63,45	62,52	150	64,21	63,13
180	55,98	54,40	60,93	60,20	180	62,92	61,74	180	63,74	62,53
210	53,94	--	60,09	58,98	210	62,36	--	210	63,26	61,88
240	51,05	51,71	59,06	--	240	61,69	60,91	270	62,95	61,20
270	48,04	48,82	57,72	57,66	270	60,82	60,08	330	62,40	59,60
300	45,62	45,71	56,84	56,26	300	60,35	59,05	390	61,63	58,86
330	43,02	43,05	56,05	54,75	330	59,75	58,02	450	61,17	57,05
360	40,40	--	55,31	--	360	59,12	--	510	60,23	56,08
390	37,55	38,88	54,01	53,16	390	58,42	56,99	570	59,05	53,98
420	34,58	35,19	52,84	51,46	420	57,95	55,79	630	58,04	52,85
450	32,02	31,32	51,52	49,65	450	56,94	54,58	690	56,20	51,64
480	28,88	--	50,44	--	480	56,19	--	750	54,50	50,37
510	26,00	27,33	49,22	47,73	510	55,41	53,29	810	53,13	47,67
540	23,51	--	47,84	45,70	540	54,65	52,11	870	51,09	46,21
570	20,69	23,22	46,69	43,55	570	53,78	--	930	49,26	44,66
600	18,36	19,06	45,32	--	600	52,84	50,62	990	46,67	--
630	15,75	14,86	44,11	41,22	630	51,94	49,19	1050	44,28	43,02
660	13,40	--	42,73	--	660	50,84	--	1110	41,74	41,31
690	12,03	12,32	40,85	38,91	690	49,63	47,48	1170	38,68	39,50
750	9,15	10,65	37,23	36,39	720	48,75	45,68	1230	36,37	37,58
780	--	--	35,57	33,73	750	47,59	--	1290	33,01	35,57
810	--	--	33,31	--	780	46,48	43,91	1350	31,24	33,44
840	--	--	32,06	30,94	810	45,38	--	1410	28,84	31,18
870	--	--	30,21	--	840	44,61	42,03	1470	27,16	--
900	--	--	28,21	28,01	870	44,11	--	1530	25,02	28,83
930	--	--	26,03	--	900	42,91	40,05	1590	23,11	--
960	--	--	24,33	--	930	41,89	--	1650	21,16	26,31

Anexos

990	--		22,48	24,95	960	40,78	37,97	1710	19,54	23,14
1020	--		21,20	--	990	39,22	--	1770	17,75	--
1050	--		19,26	21,69	1110	34,72	33,41	1830	16,35	20,82
1080	--		17,46	--	1170	31,59	30,96	1890	15,15	--
1110	--		15,51	18,37	1230	28,69	28,37	1950	14,35	17,84
1170	--		12,72	14,89	1290	25,13	--	2010	13,98	--
1230	--		10,25	13,46	1350	20,41	25,65	2070	13,63	14,71
--	--		--	--	1410	16,34	22,78	2130	13,23	11,74
--	--		--	--	1470	12,66	19,68	-----	--	--
--	--		--		1530	11,00	13,83	-----	--	--
--	--					--	--	--	--	--

ANEXO 32 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Michigan da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 61 %, base úmida, temperatura do ar de secagem de 70 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2		t (min)	Camada 3		t (min)	Camada 4	
	U _{exp}	U _{pred}	U _{exp}	U _{pred}		U _{exp}	U _{pred}		U _{exp}	U _{pred}
0	61,07	61,07	61,07	61,07	0	61,07	61,07	0	61,07	61,07
30	58,82	59,02	60,12	60,25	30	60,97	60,34	30	61,23	60,51
60	57,00	56,24	58,76	58,22	60	60,60	59,33	60	61,15	59,97
90	54,38	53,05	57,38	57,12	90	60,01	58,51	90	60,55	59,51
120	51,66	50,34	55,90	56,92	120	59,21	57,77	120	60,12	59,07
150	48,78	47,47	54,60	55,60	150	58,37	56,90	150	59,68	58,42
180	45,32	44,28	53,14	54,11	180	57,37	55,75	180	59,25	57,48
210	42,50	41,15	52,14	52,56	210	56,26	54,87	210	58,82	56,45
240	39,55	37,93	50,52	50,93	240	55,25	53,45	240	58,23	55,46
270	35,98	34,08	48,60	49,26	270	54,23	51,72	270	57,44	54,40
300	31,79	30,43	47,11	47,48	300	52,55	50,21	300	56,94	53,60
330	27,91	27,00	45,43	45,74	330	51,40	48,67	330	56,29	52,49
360	25,14	23,00	43,96	44,01	360	49,62	47,08	360	55,77	51,67
390	21,31	19,67	42,19	42,30	390	48,24	46,06	390	55,08	50,79
420	18,53	16,53	40,30	40,60	420	46,53	44,77	420	54,24	49,97
450	15,99	13,69	38,73	39,10	450	45,23	43,15	450	53,51	49,29
480	13,45	11,72	36,67	37,13	480	43,42	41,53	480	52,76	48,49
510	11,11	9,69	33,95	34,82	510	41,96	40,07	510	51,58	47,73
540	10,09	8,90	31,95	32,82	540	40,78	38,10	540	50,60	47,05
570	9,20	8,06	29,65	31,87	570	38,68	36,91	570	49,58	46,32
600	--	--	26,90	30,09	600	37,17	35,58	600	48,33	45,68
630	--	--	25,03	27,43	630	36,01	34,26	630	47,30	45,04
660	--	--	22,27	24,85	660	35,01	32,73	660	46,03	44,37
690	--	--	20,05	23,03	690	33,01	31,72	690	45,02	43,77
720	--	--	16,94	19,92	720	31,19	31,27	720	43,53	43,12
750	--	--	14,38	17,55	750	30,10	29,65	750	42,53	42,50
780	--	--	11,66	15,72	780	28,31	28,56	780	41,26	--
810	--	--	10,01	13,95	810	27,04	28,01	810	39,30	41,36
840	--	--	9,05	11,87	840	25,65	27,38	840	38,15	--
--	--	--	--	--	870	24,24	26,10	870	37,08	40,15
--	--	--	--	--	900	22,37	25,09	900	36,12	--
--	--	--	--	--	930	20,94	23,56	930	34,34	39,35

Anexos

--	--	--	--	--	960	19,46	22,18	960	33,10	--
--	--	--	--	--	1020	16,94	19,89	1020	30,57	38,27
--	--	--	--	--	1080	14,63	17,56	1080	28,62	37,46
--	--	--	--	--	1140	12,20	15,02	1140	26,55	36,89
--	--	--	--	--	1200	10,47	13,53	1200	23,77	35,74
--	--	--	--	--		--	--	1260	21,39	35,45
--	--	--	--	--		--	--	1320	18,58	35,11
--	--	--	--	--		--	--	1380	16,79	34,64
--	--	--	--	--		--	--	1440	13,98	33,95
--	--	--	--	--		--	--	1500	12,19	33,07
--	--	--	--	--		--	--	1560	10,61	32,98

ANEXO 33 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Thompson da secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 61 %, base úmida, temperatura do ar de secagem de 70 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2		t (min)	Camada 3		t (min)	Camada 4	
	U _{exp}	U _{pred}	U _{exp}	U _{pred}		U _{exp}	U _{pred}		U _{exp}	U _{pred}
0	61,07	61,09	61,07	61,09	0	61,07	61,09	0	61,07	61,09
30	58,82	59,60	60,12	60,27	30	60,97	60,57	30	61,23	60,71
60	57,00	57,37	58,76	59,08	60	60,60	59,79	60	61,15	60,16
90	54,38	54,73	57,38	57,68	90	60,01	58,90	90	60,55	59,53
120	51,66	51,74	55,90	56,08	120	59,21	57,89	120	60,12	58,83
150	48,78	48,43	54,60	54,32	150	58,37	56,78	150	59,68	58,71
180	45,32	44,87	53,14	52,43	180	57,37	--	180	59,25	57,84
210	42,50	41,04	52,14	--	210	56,26	55,58	210	58,82	--
240	39,55	--	50,52	50,37	240	55,25	54,30	240	58,23	56,70
270	35,98	37,03	48,60	48,16	270	54,23	52,93	270	57,44	55,97
300	31,79	32,84	47,11	45,86	300	52,55	51,48	300	56,94	54,80
330	27,91	28,62	45,43	43,41	330	51,40	49,95	330	56,29	53,95
360	25,14	24,36	43,96	41,85	360	49,62	--	360	55,77	--
390	21,31	20,19	42,19	39,71	390	48,24	48,32	390	55,08	52,94
420	18,53	--	40,30	--	420	46,53	46,64	420	54,24	51,76
450	15,99	16,07	38,73	35,88	450	45,23	44,84	450	53,51	49,87
480	13,45	--	36,67	33,78	480	43,42	42,99	480	52,76	--
510	11,11	12,13	33,95	--	510	41,96	--	510	51,58	48,61
540	10,09	--	31,95	29,81	540	40,78	41,04	540	50,60	47,74
570	9,20	8,45	29,65	27,42	570	38,68	38,99	570	49,58	--
600	--	--	26,90	--	600	37,17	--	600	48,33	45,89
630	--	--	25,03	23,32	630	36,01	36,91	630	47,30	44,44
660	--	--	22,27	20,92	660	35,01	34,68	660	46,03	--
690	--	--	20,05	--	690	33,01	--	690	45,02	42,92
720	--	--	16,94	17,00	720	31,19	32,41	720	43,53	41,90
750	--	--	14,38	--	750	30,10	--	750	42,53	--
780	--	--	11,66	13,83	780	28,31	30,05	780	41,26	39,23
810	--	--	10,01	--	810	27,04	27,61	810	39,30	--
840	--	--	9,05	10,69	840	25,65	--	840	38,15	38,04
--	--	--	--	--	870	24,24	25,09	870	37,08	--
--	--	--	--	--	900	22,37	--	900	36,12	36,07
--	--	--	--	--	930	20,94	22,54	930	34,34	34,03

Anexos

	--	--	--	--	960	19,46	19,87	960	33,10	--
	--	--	--	--	1020	16,94	--	1020	30,57	32,24
	--	--	--	--	1080	14,63	14,42	1080	28,62	30,14
	--	--	--	--	1140	12,20	11,62	1140	26,55	28,47
	--	--	--	--	1200	10,47	8,80	1200	23,77	24,18
	--	--	--	--		--	--	1260	21,39	--
	--	--	--	--		--	--	1320	18,58	22,06
	--	--	--	--		--	--	1380	16,79	19,55
	--	--	--	--		--	--	1440	13,98	17,08
	--	--	--	--		--	--	1500	12,19	14,53
	--	--	--	--		--	--	1560	10,61	10,15

ANEXO 34 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Michigan da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 64 %, base úmida, temperatura de 50 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2	
	T _{exp}	T _{pred}	T _{exp}	T _{pred}
0	26,0	26,0	26,0	26,0
30	32,3	36,9	30,5	32,1
60	33,1	38,3	30,8	32,4
90	34,1	38,7	31,4	33,1
120	35,6	39,2	31,7	33,7
150	36,5	39,7	32,1	34,4
180	37,8	40,3	32,5	35,3
210	38,4	40,9	33,6	35,8
240	39,6	41,5	34,2	36,5
270	40,3	42,0	35,2	37,6
300	41,6	42,7	35,8	38,3
330	42,8	43,0	36,5	38,9
360	44,3	43,7	37,3	39,3
420	44,5	44,2	39,3	40,6
480	44,8	45,3	40,6	41,3
540	44,5	45,9	41,8	42,6
600	45,6	46,4	42,4	43,7

ANEXO 35 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Michigan da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 65 %, base úmida, temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4	
	T _{exp}	T _{pred}	T _{exp}	T _{pred}	T _{exp}	T _{pred}	T _{pred}	T _{pred}
0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0
30	35,8	36,5	33,1	35,2	30,0	32,1	28,4	29,2
60	37,4	39,1	33,7	35,7	30,3	32,3	28,6	29,6
90	39,7	42,3	34,2	36,7	30,6	32,6	29,0	30,2
120	40,1	43,1	34,6	37,4	31,5	33,2	29,3	30,6
150	40,6	44,5	35,2	38,0	32,3	33,7	29,5	31,2
180	41,4	46,9	35,7	38,4	33,0	34,2	29,9	31,6
210	42,1	48,3	37,3	39,8	33,6	34,7	30,0	32,0
240	45,4	49,6	38,5	41,3	34,1	35,4	30,2	32,2
270	50,6	50,4	40,4	42,7	35,4	36,9	30,5	32,6
300	52,3	52,5	41,3	43,6	36,6	38,2	31,6	32,8
330	53,6	53,4	43,8	44,8	37,9	39,4	32,7	33,5
360	54,2	54,5	44,3	45,9	39,6	40,3	34,8	34,6

ANEXO 36 - Dados experimentais e dados preditos pelo modelo de Michigan da variação da temperatura média da camada de grãos, durante a secagem em camada espessa do feijão-macáçar com teor médio de água inicial de 61 %, base úmida, temperatura de 70 °C e velocidade do ar de 0,7 m/s.

t (min)	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4	
	T _{exp}	T _{pred}	T _{exp}	T _{pred}	T _{exp}	T _{pred}	T _{pred}	T _{pred}
0	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5
30	40,2	42,3	36,2	38,9	31,5	35,0	30,1	31,2
60	43,3	45,8	37,6	39,9	33,8	35,8	30,8	31,9
90	44,8	47,2	38,2	40,2	34,9	36,2	31,4	32,2
120	46,4	48,6	39,8	41,4	35,3	37,1	32,5	32,4
150	47,6	50,6	40,7	42,5	36,2	37,7	33,4	33,4
180	49,1	51,6	41,3	43,6	37,2	38,7	34,5	33,9
210	50,9	53,6	42,5	44,9	38,1	39,2	35,2	36,4
240	53,7	55,6	43,2	45,6	39,4	40,8	36,1	36,6
270	55,3	57,4	44,6	46,8	40,6	41,7	36,9	37,1
300	57,4	59,2	45,8	47,7	41,2	42,5	37,7	37,8
330	60,6	60,9	46,6	48,7	41,9	43,4	38,3	38,4
360	63,1	62,3	47,6	50,3	42,6	44,5	39,4	38,8

ANEXO 37 – Programa de simulação de secagem em leito fixo pelo modelo de Michigan, escrito em linguagem “C” para o ambiente Mathematica,

```

Remove["Global*"]
(*PROGRAMA ESCRITO POR VOLUMES FINITOS*)
(*DADOS DO FEIJÃO COM 40% DE AGUA, (b, u,), EQUAÇÃO DE CAMADA FINA DE PAGE*)
npy = 10;
npx = 1;
tmax = 33000; (*tempo de secagem, s*)
Experimento = 1;
If[Experimento == 1,
  (*dados de entrada do ar*)
  Tao1 = 50; (*Temperatura do ar na entrada, oC*);
  xao1 = 0,01232; (*Umidade absoluta do ar na entrada,
  kg agua/kg ar seco*);
  wao1 = 0,7; (*Velocidade do ar na entrada, m/s*);
  kao1 = 0,029587; (*condutividade térmica do ar, W/m^2K*);
  miao1 = 20,82648*10^(-6); (*viscosidade dinâmica do ar, N s/m^2*);
  (*XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX*)
  (*dados de entrada do leito*)
  H = 0,15; (*altura do leito na direção do escoamento, m*)
  L = 0,15; (*Largura do leito, m*)
  (*XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX*)
  (*dados de entrada do material*)
  Mpo = 0,67;(*teor de umidade inicial, base seca, decimal*)
  Tpo = 30,0; (*temperatura do produto*)
  Mpe = 0,055;(*umidade de equilibrio a 70°C*)
  rop = 782,65; (*massa específica aparente do produto kg/m^3*)
  eps = 0,45;(*porosidade do produto*)
  area = 0,000175; (*area da particula, m^2, atualizado*)
  volume = 2,29746*10^(-7);(*volume da particula, m^3, atualizado*)
  dp = (6*volume/Pi)^(1/3);(*diâmetro de uma esfera de igual volume do sólido*)
  , ];
  (*XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX*)
a = (area*(1 - eps))/volume;
auxR = 22105649,25;
auxA = -27405,53;
auxB = 97,5413;

```

```

auxC = -0,146244;
auxD = 0,12558*10^(-3);
auxE = -0,48502*10^(-7);
auxF = 4,34903;
auxG = 0,39381*10^(-2);
Patm = 101325;
MMa = 28,96;
Runiv = 8314,34;
auxroa = Patm*MMa/Runiv;
(*XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX*)
y = Array[0 &, {npy}];
i = 1;
Mp = Array[Mpo &, {npy}];
Tp = Array[Tpo &, {npy}];
Mpold = Array[0 &, {npy}];
Tpold = Array[0 &, {npy}];
Mpe = Array[0 &, {npy}];
(*XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX*)
wa = waol;
dy = H/(npy - 1);
Do[
  y[[j]] = (j - 1)*dy;
  , {j, 1, npy}];
dt = dy/wa;
dz = L;
z = L;
Pvs = Array[0 &, {npy}];
Ur = Array[0 &, {npy}];
apmp = Array[0 &, {npy}];
apomp = Array[0 &, {npy}];
scmp = Array[0 &, {npy}];
aptp = Array[0 &, {npy}];
apotp = Array[0 &, {npy}];
sctp = Array[0 &, {npy}];
apta = Array[0 &, {npy}];
apota = Array[0 &, {npy}];
asta = Array[0 &, {npy}];
scta = Array[0 &, {npy}];
apxa = Array[0 &, {npy}];

```

```

apoxa = Array[0 &, {npy}];
asxa = Array[0 &, {npy}];
scxa = Array[0 &, {npy}];
(*XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX*)
xa = Array[xao1 &, {npy}];
Ta = Array[Tao1 &, {npy}];
xaold = Array[0 &, {npy}];
Taold = Array[0 &, {npy}];
graf = Array[0 &, {npy}];
(*XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX*)
graf[[1]] = {0, Mp[[1]], Tp[[1]], xa[[1]], Ta[[1]]};
imax = 9000000;
t = 0;
ii = 0;
(*Início do processo transiente*)
While[t <= tmax && ii <= imax,
  (*XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX*)
  t = t + dt;
  ii = ii + 1;
  Do[
    Mpold[[j]] = Mp[[j]];
    Taold[[j]] = Ta[[j]];
    Tpold[[j]] = Tp[[j]];
    xaold[[j]] = xa[[j]];
    , {j, 1, npy}];
  (*XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX*)
  Ta[[1]] = Tao1 ;
  xa[[1]] = xao1;
  wa = wao1;
  ka = kao1;
  mia = miao1;
  roa = auxroa/(Tao1 + 273,15);
  qa = roa*wa;
  (*XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX*)
  Do[
    (*Parâmetros do ar, vapor e água*)
    ca = (1,00926 - 4,04033*10^(-5)*Ta[[j]] +
      6,17596*10^(-7)*Ta[[j]]^2 - 4,09723*10^(-10)*Ta[[j]]^3)*10^3;
    mia = (1,69111*10^(-5) + 4,98424*10^(-8)*Ta[[j]] -

```

$3,18702 \cdot 10^{(-11)} \cdot Ta[[j]]^2 + 1,31965 \cdot 10^{(-14)} \cdot Ta[[j]]^3$;
 $ka = (2,42503 \cdot 10^{(-2)} + 7,88913 \cdot 10^{(-5)} \cdot Ta[[j]] -$
 $1,79034 \cdot 10^{(-8)} \cdot Ta[[j]]^2 - 8,5705 \cdot 10^{(-12)} \cdot Ta[[j]]^3)$;
 $cv = (1,8830 - 0,16737 \cdot 10^{(-3)} \cdot (Ta[[j]] + 273,15) + 0,84386 \cdot 10^{(-6)} \cdot$
 $(Ta[[j]] + 273,15)^2 -$
 $0,26966 \cdot 10^{(-9)} \cdot (Ta[[j]] + 273,15)^3) \cdot 10^3$;
 $cw = (2,82232 + 1,18277 \cdot 10^{(-2)} \cdot (Ta[[j]] + 273,15) - 3,5047 \cdot 10^{(-5)} \cdot$
 $(Ta[[j]] + 273,15)^2 +$
 $3,6010 \cdot 10^{(-8)} \cdot (Ta[[j]] + 273,15)^3) \cdot 10^3$;
 $roa = auxroa / (Ta[[j]] + 273,15)$;
 $Rey = roa \cdot wa \cdot dp / mia$;
 $pr = ca \cdot mia / ka$;
 $hc = (ka / dp) \cdot (2 + 0,6 \cdot Rey^{(1/2)} \cdot pr^{(1/3)})$;
 (*XX*)
 (*Parâmetros do produto*)
 $cp = 1,403 \cdot 10^3$;
 $If[Ur[[j]] > 0,9,$
 $Ur[[j]] = 0,9]$;
 $Mpe[[j]] = (Log[1 - Ur[[j]]) / (-0,174942 \cdot ((Ta[[j]]) + 50,11796)))^{0,616}$;
 (*hfg = (598 - 0,57 * Ta[[j]]) * (1 +
 $0,238621 \cdot Exp[-0,049013 \cdot Mpe[[j]]) \cdot 4186,69$;
 $hfg = (598 - 0,57 \cdot Ta[[j]]) \cdot 4186,69$;
 (*XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX **EQUAÇÃO DE PAGE** XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX*)
 $Nconst = -0,715899 \cdot Ta[[j]] + (1,449253 \cdot Mpo) + (2,163955 \cdot Mpo \cdot (Ta[[j]]) - (1,63865 \cdot$
 $Ta[[j]] \cdot Mpo^2)$;
 $Kconst = -1,2149 + Exp[0,19048 + (0,00007 \cdot Ta[[j]]) + (0,005974 \cdot Mpo) - (0,000092 \cdot Ta[[j]] \cdot$
 $Mpo)]$;
 $dmdt = -Kconst \cdot Nconst \cdot t^{(Nconst - 1)} \cdot Exp[-Kconst \cdot t^{Nconst}] \cdot (Mpo - Mpe[[j]])$;
 (*XX*)
 (*Coeficientes da equação discretizada*)
 (*XX*)
 $apomp[[j]] = dz / dt$;
 $scomp[[j]] = dmdt \cdot dz$;
 $apmp[[j]] = apomp[[j]]$;
 $apotp[[j]] = dz / dt$;
 $sctp[[j]] = (a \cdot hc \cdot Ta[[j]] + (hfg + cv \cdot Ta[[j]]) \cdot rop \cdot dmdt) /$
 $(rop \cdot cp + rop \cdot cw \cdot Mp[[j]]) \cdot dz$;
 $aptp[[j]] = apotp[[j]] + (a \cdot hc + cv \cdot rop \cdot dmdt) /$
 $(rop \cdot cp + rop \cdot cw \cdot Mp[[j - 1]]) \cdot dz$;

```

(*XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX*)
asta[[j]] = wa/eps;
apota[[j]] = dy/dt;
apta[[j]] =
  apota[[j]] + asta[[j]] + a*hc*dy/(eps*(roa*ca + roa*xa[[j]]*cv));
scta[[j]] = a*hc*dy/(eps*(roa*ca + roa*xa[[j - 1]]*cv))*Tp[[j - 1]];
(*XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX*)
asxa[[j]] = roa*wa/eps;
apoxa[[j]] = roa*dy/dt;
apxa[[j]] = asxa[[j]] + apoxa[[j]];
scxa[[j]] = -rop*dmdt*dy/eps;
(*XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX*)
Mp[[j]] = (apomp[[j]]*Mpold[[j]] + scmp[[j]])/apmp[[j]];
Tp[[j]] = (apotp[[j]]*Tpold[[j]] + sctp[[j]])/aptp[[j]];
Ta[[j]] = (asta[[j]]*Ta[[j - 1]] + apota[[j]]*Taold[[j]] + scta[[j]])/
  apta[[j]];
xa[[j]] = (asxa[[j]]*xa[[j - 1]] + apoxa[[j]]*xaold[[j]] + scxa[[j]])/
  apxa[[j]];
(*XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX*)
Pvs[[j]] =
  auxR*Exp[(auxA + auxB*(Ta[[j]] + 273,16) + auxC*(Ta[[j]] + 273,16)^2 +
    auxD*(Ta[[j]] + 273,16)^3 +
    auxE*(Ta[[j]] + 273,16)^4)/(auxF*(Ta[[j]] + 273,16) -
    auxG*(Ta[[j]] + 273,16)^2);
Ur[[j]] = xa[[j]]*Patm/((xa[[j]] + 0,622)*Pvs[[j]]);
(*Processo de condensação*)
If[Ur[[j]] > 1,
  iterlin = 0;
  iterlinmax = 100000;
  Uraux = Ur[[j]];
  xalin = xa[[j]];
  dxalin = 10^(-8);
  Mplin = Mp[[j]];
  Talin = Ta[[j]];
  While[Uraux > 1 && iterlin < iterlinmax,
    iterlin = iterlin + 1;
    ca = 1,00926 - 4,04033*10^(-5)*Talin +
      6,17596*10^(-7)*Talin^2 - 4,09723*10^(-10)*Talin^3;
    mia = (1,69111*10^(-5) + 4,98424*10^(-8)*Talin -

```



```

rop*dy*(cp + cw*Mp[[j]])*Tp[[j]] -
rop*dy*(cp + cw*Mplin)*Tp[[j]] -
roa*wa*(dt)*hfg*(xalin - xa[[j]])/(roa*wa*
dt*(ca + cv*xalin));
Pvsaux =
auxR*Exp[(auxA + auxB*(Talin + 273,16) + auxC*(Talin + 273,16)^2 +
auxD*(Talin + 273,16)^3 +
auxE*(Talin + 273,16)^4)/(auxF*(Talin + 273,16) -
auxG*(Talin + 273,16)^2)];
Uraux = xalin*Patm/((xalin + 0,622)*Pvsaux);
(*
Print[Talin, " ", Uraux, " ", iterlin, " ", j, " ", ii];
*)
xalin = xalin - dxalin;

];
Ur[[j]] = Uraux;
Ta[[j]] = Talin;
xa[[j]] = xalin;
Mp[[j]] = Mplin;
Tp[[j]] = Tplin;
Pvs[[j]] = Pvsaux;
]; (*Fim do If*)

, {j, 2, npy});
(*Valores das grandezas em y = 0m*)
caj1 = (1,00926 - 4,04033*10^(-5))*Ta[[1]] +
6,17596*10^(-7)*Ta[[1]]^2 - 4,09723*10^(-10)*Ta[[1]]^3)*10^3;
mia = (1,69111*10^(-5) + 4,98424*10^(-8))*Ta[[1]] -
3,18702*10^(-11)*Ta[[1]]^2 + 1,31965*10^(-14)*Ta[[1]]^3);
ka = (2,42503*10^(-2) + 7,88913*10^(-5))*Ta[[1]] -
1,79034*10^(-8)*Ta[[1]]^2 - 8,5705*10^(-12)*Ta[[1]]^3);
cvj1 = (1,8830 - 0,16737*10^(-3))*(Ta[[1]] + 273,15) + 0,84386*10^(-6)*
(Ta[[1]] + 273,15)^2 - 0,26966*10^(-9)*(Ta[[1]] + 273,15)^3)*10^3;
cwj1 = (2,82232 + 1,18277*10^(-2))*(Ta[[1]] + 273,15) - 3,5047*10^(-5)*
(Ta[[1]] + 273,15)^2 + 3,6010*10^(-8)*(Ta[[1]] + 273,15)^3)*10^3;
roaj1 = auxroa/(Ta[[1]] + 273,15);
(*cpj1 = 2,88*10^3;*)
cpj1 = 1,403*10^3;

```

```

Rey = roaj1 * wa * dp / mia;
pr = caj1 * mia / ka;
hc = (ka / dp) * (2 + 0,6 * Rey^(1/2) * pr^(1/3));
If[Ur[[1]] > 0,9,
  Ur[[1]] = 0,9];
Mpe[[1]] = (Log[1 - Ur[[1]]] / (-0,174942 * (Ta[[1]] + 50,11796)))^0,616;
(*hfgj1 = (598 - 0,57 * Ta[[1]]) * (1 + 0,238621 * Exp[-0,049013 * Mpe[[1]])] * 4186;*)
hfgj1 = (598 - 0,57 * Ta[[1]]) * 4186,69;
(*XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX EQUAÇÃO DE PAGE XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX*)
Nconst = -0,715899 * Ta[[1]] + (1,449253 * Mpo) + (2,163955 * Mpo * (Ta[[1]])) - (1,63865 *
  Ta[[1]] * Mpo^2);
Kconst = -1,2149 + Exp[0,19048 + (0,00007 * Ta[[1]]) + (0,005974 * Mpo) - (0,000092 * Ta[[1]] *
  Mpo)];
dmdt1 = -Kconst * Nconst * t^(Nconst - 1) * Exp[-Kconst * t^Nconst] * (Mpo - Mpe[[1]]);
(*XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX*)
apomp[[1]] = dz/dt; (*o dt na direção z diferente do dt da direção y*);
scmp[[1]] = dmdt1 * dz;
apmp[[1]] = apomp[[1]];
Mp[[1]] = (apomp[[1]] * Mpold[[1]] + scmp[[1]]) / apmp[[1]];
apotp[[1]] = dz/dt;
sctp[[1]] = ( a * hc * Ta[[1]] + (hfgj1 + cvj1 * Ta[[1]]) * rop * dmdt1 ) /
  (rop * cpj1 + rop * cwj1 * Mp[[1]]) * dz;
aptp[[1]] = apotp[[1]] + ( a * hc + cvj1 * rop * dmdt1 ) /
  (rop * cpj1 + rop * cwj1 * Mp[[1]]) * dz;
Tp[[1]] = (apotp[[1]] * Tpold[[1]] + sctp[[1]]) / aptp[[1]];
Pvs[[1]] =
  auxR * Exp[(auxA + auxB * (Ta[[1]] + 273,16) + auxC * (Ta[[1]] + 273,16)^2 +
    auxD * (Ta[[1]] + 273,16)^3 +
    auxE * (Ta[[1]] + 273,16)^4) / (auxF * (Ta[[1]] + 273,16) -
    auxG * (Ta[[1]] + 273,16)^2)];
Ur[[1]] = xa[[1]] * Patm / ((xa[[1]] + 0,622) * Pvs[[1]]);
Mleito = Sum[Mp[[i]], {i, 1, npy}] / npy;
(*Impressão dos resultados*)
If[ii == 1 || ii == 10 || ii == 20 || ii == 40 || ii == 60 || ii == 80 || ii == 100 || ii == 200 || ii == 500 || ii ==
1000 || ii == 1100 || ii == 1200 || ii == 1300 || ii == 1400 || ii == 1500 || ii == 1600 || ii == 1700 || ii ==
1800 || ii == 1900 || ii == 2000 || ii == 2100 || ii == 2200 || ii == 2300 || ii == 2400 || ii == 2500 || ii ==
2600 || ii == 2700 || ii == 2800 || ii == 2900 || ii == 3000 || ii == 3100 || ii == 3200 || ii == 3300 || ii ==
3400 || ii == 3500 || ii == 3600 || ii == 3700 || ii == 3800 || ii == 3900 || ii == 4000 || ii == 5100 || ii ==
5200 || ii == 5300 || ii == 5400 || ii == 5500 || ii == 5600 || ii == 5700 || ii == 5800 || ii == 5900 || ii ==

```

```

6000 || ii == 6100 || ii == 6200 || ii == 6300 || ii == 6400 || ii == 6500 || ii == 6600 || ii == 6700 || ii ==
6800 || ii == 6900 || ii == 7000 || ii == 7100 || ii == 7200 || ii == 7300 || ii == 7400 || ii == 7500 || ii ==
7600 || ii == 7700 || ii == 7800 || ii == 7900 || ii == 8000 || ii == 8100 || ii == 8200 || ii == 8300 || ii ==
8400 || ii == 8500 || ii == 8600 || ii == 8700 || ii == 8800 || ii == 8900 || ii == 9000 || ii == 9100 || ii ==
9200 || ii == 9300 || ii == 9400 || ii == 9500 || ii == 9600 || ii == 9700 || ii == 9800 || ii == 9900 || ii ==
10000 || ii == 10100 || ii == 10200 || ii == 10300 || ii == 10400 || ii == 10500 || ii == 10600 || ii == 10700 ||
ii == 10800 || ii == 10900 || ii == 11000 || ii == 11100 || ii == 11200 || ii == 11300 || ii == 11400 || ii ==
11500 || ii == 11600 || ii == 11700 || ii == 11800 || ii == 11900 || ii == 12000 || ii == 12100 || ii == 12200 ||
ii == 12300 || ii == 12400 || ii == 12500 || ii == 12600 || ii == 12700 || ii == 12800 || ii == 12900 || ii ==
13000 || ii == 14000 || ii == 15000 || ii == 16000 || ii == 8660000 || ii == 8710000 || ii == 8760000 || ii ==
8810000 || ii == 8860000 || ii == 8910000 || ii == 8960000,
Print[" "];
Print["          ", "t=", t, "s          ", "z=", z // N,
      "m", " ", "ii=", ii];
Print[" "];
Print["y(m)", MatrixForm[y] // N, " ", "M(kg/kg)", MatrixForm[Mp], " ",
      "\[Theta](oC)", MatrixForm[Tp], " ", "x(kg/kg)", MatrixForm[xa] ];
Print["T(oC)", MatrixForm[Ta], " ", "Pvs(Pa)", MatrixForm[Pvs], " ",
      "UR", MatrixForm[Ur], " ", "Meq(kg/kg)", MatrixForm[Mpe] ];
Print[" "];
Print["Mmedio(kg/kg)", " ", Mleito];
, ];
];

```

	(0.)		(1.74374)		(27.3338)		(0.01221)
	0.0157895		1.74408		26.7084		0.0131926
	0.0315789		1.74421		26.1472		0.0141422
	0.0473684		1.74422		25.6654		0.01508
	0.0631579		1.74416		25.2545		0.0160188
	0.0789474		1.74406		24.9057		0.0169656
	0.0947368		1.74396		24.6107		0.0179241
	0.110526		1.74385		24.3617		0.0188959
	0.126316		1.74374		24.152		0.0198811
	0.142105		1.74364		23.9756		0.0208795
y (m)	0.157895	M (kg/kg)	1.74356	θ (oC)	23.8274	x (kg/kg)	0.0218901
	0.173684		1.74348		23.7029		0.022912
	0.189474		1.74354		15.6918		0.0239231
	0.205263		1.74362		15.8309		0.0249241
	0.221053		1.74369		16.0944		0.0259165
	0.236842		1.74375		16.3411		0.0269012
	0.252632		1.7438		16.5755		0.0278791
	0.268421		1.74385		16.7969		0.0288508
	0.284211		1.7439		17.0064		0.0298171
	(0.3)		(1.74394)		(17.2052)		(0.0307784)

	(50)		(12333.9)		(0.158161)		(0.057997)
	45.6024		9881.99		0.21296		0.0730645
	41.9801		8189.54		0.275054		0.0897342
	38.976		6981.71		0.343529		0.108082
	36.4733		6096.26		0.417303		0.128261
	34.3809		5432.32		0.49525		0.150562
	32.6265		4924.9		0.576274		0.175505
	31.1522		4530.82		0.659354		0.204026
	29.9109		4220.58		0.743586		0.237919
	28.8643		3973.52		0.828194		0.281156
T(oC)	27.9807	Pvs(Pa)	3774.85	UR	0.912544	Meq(kg/kg)	0.333913
	27.2342		3613.78		0.996132		0.335894
	27.9014		3757.44		0.998762		0.336526
	28.5591		3903.89		0.999964		0.337679
	29.21		4053.7		0.999821		0.336098
	29.8462		4204.92		0.998967		0.334514
	30.4356		4349.39		0.999388		0.333011
	31.0183		4496.43		0.998906		0.331602
	31.5606		4637.15		0.99955		0.330253
	(32.1008)		(4781.09)		(0.99924)		(0.328982)

