



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

Centro de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Agrícola

Área de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas



DISSERTAÇÃO

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SECAGEM DE FEIJÃO
MACASSAR (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.): CONTRAÇÃO
VOLUMÉTRICA DA CAMADA ESPESSA**

Jorge Alves de Sousa

Campina Grande – PB

Abril / 2004



Jorge Alves de Sousa

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SECAGEM DE FEIJÃO
MACASSAR (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.): CONTRAÇÃO
VOLUMÉTRICA DA CAMADA ESPESSA**

Dissertação apresentada ao curso
de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola da Universidade Federal
de Campina Grande, em
cumprimento às exigências para
obtenção do grau de Mestre.

Orientadores:

Prof. Dr. Mário Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata

Prof^ª. Dr^ª. Maria Elita Martins Duarte

Campina Grande – PB

Abril / 2004



S725m Sousa, Jorge Alves de
Modelagem e simulacao de secagem de feijao macassar
(Vigna unguiculata (L.) Walp.): contracao volumetrica da
camada espessa / Jorge Alves de Sousa.- Campina Grande,
2004.
110 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Agricola) -
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciencias
e Tecnologia..

1. Modelo 2. Contracao Volumetrica 3. Dissertacao I.
Mata, Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti, Dr. II.
Duarte, Maria Elita Martins, Dra. III. Universidade Federal
de Campina Grande - Campina Grande (PB) IV. Título

CDU 531.364.52(043)



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

JORGE ALVES DE SOUSA

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SECAGEM DE FEIJÃO
MACASSAR (*Vigna unguiculata* (L.) Walpers): CONTRAÇÃO
VOLUMÉTRICA DA CAMADA ESPESSA

BANCA EXAMINADORA

PARECER

Mário Eduard
Dr. Mário Eduardo R.M. Cavalcanti Mata-Orientador

APROVADO

Maria Elita
Dra. Maria Elita Martins Duarte-Orientadora

APROVADO

Juarez Paz
Dr. Juárez Paz Hedroza-Examinador

Aprovada

Romeu Fioreze
Dr. Romeu Fioreze-Examinador

Aprovado

ABRIL - 2004

Dedico este Trabalho

A Deus

À minha esposa

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter dado forças e perseverança durante todo o período deste curso.

À Universidade Federal de Campina Grande pela oportunidade oferecida para realização deste curso de Mestrado em Engenharia Agrícola.

Aos Professores Mário Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata e Maria Elita Martins Duarte pela orientação e ensinamentos recebidos no decorrer deste Curso.

A minha esposa Inalda pelo companheirismo e compreensão no decorrer deste Curso.

Aos meus pais João Alves de Sousa (*in memoriun*) e Maria Salete de Freitas, pelo incentivo a educação.

A todos os professores da Pós-Graduação (Área de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas).

A Professora Odelsia Sanches pelo apoio despendido na realização deste trabalho.

Aos professores Juarez Paz Pedroza e Romeu Fioreze, pela contribuição.

A Coordenação do curso, em especial a Rivanilda pela atenção e dedicação.

Aos funcionários da Área de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, em especial ao analista de sistema Luis Antonio Dantas.

Aos amigos, Yvson, Carmel, Dinis, Sheyla, Concita, Luciclea, Granjeiro, Ranilda, Sandra e Sckaymenn.

SUMÁRIO

	Páginas
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	04
2.1. Considerações gerais.....	04
2.2. Equações do produto necessárias a simulação de secagem.....	05
2.2.1. Conteúdo de água de equilíbrio.....	05
2.2.2. Calor latente de vaporização.....	06
2.2.3. Calor específico.....	08
2.2.4. Equação de camada fina.....	09
2.3. Secagem em camada espessa.....	11
2.3.1. Modelos de secagem em camada espessa.....	12
2.3.2. Contração volumétrica/encolhimento.....	19
2.3.3. Simulação.....	20
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	22
3.1. Equações do produto necessárias a simulação de secagem.....	22
3.1.1. Determinação das isotermas de equilíbrio higroscópico.....	23
3.1.2. Calor latente de vaporização.....	23
3.1.3. Calor específico.....	24
3.1.3.1. Determinação do calor específico do feijão em função do conteúdo de água.....	24
3.1.3.2. Determinação da capacidade calorífica do calorímetro.....	25
3.2. Secagem em camada fina.....	26
3.3. Secagem em camada espessa.....	27
3.4. Simulação de secagem.....	29

3.4.1. Teste do modelo.....	30
3.4.2. Apresentação do programa.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1. Equilíbrio higroscópico – isothermas de dessorção.....	32
4.2. Calor latente de vaporização.....	33
4.3. Calor específico.....	37
4.4. Curvas de secagem em camada fina.....	38
4.5. Simulação de secagem em camada espessa.....	45
5. CONCLUSÕES.....	55
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
APÊNDICE A.....	63
APÊNDICE B.....	101

LISTA DE SÍMBOLOS

a	= área específica, $m^2 \times m^{-3}$
C	= capacidade calorífica, $J \times ^\circ C^{-1}$
C_c	= condutividade calorífica, $J \times ^\circ C^{-1}$
C_{cal}	= capacidade calorífica do calorímetro, $cal \times ^\circ C^{-1}$
C_a	= calor específico da água, $1 cal \times g^{-1} \times ^\circ C^{-1}$
C_{ar}	= calor específico do ar seco, $kcal \times kg^{-1} \times ^\circ C^{-1}$
C_p	= calor específico do produto, $J \times kg^{-1} \times ^\circ C^{-1}$
D_p	= fator de profundidade, adimensional
G_{ar}	= fluxo do ar de secagem, $m^3 \times min^{-1} \times m^{-2}$
h	= altura da camada, m
h_i	= altura inicial da camada, m
H	= tempo de meia resposta, horas
h'_{fg}	= calor latente de vaporização da água do produto, $J \times kg^{-1}$
h_{fg}	= calor latente molar de vaporização da água, $J \times kg \times mol^{-1}$
J	= efeito combinado de temperatura e encolhimento
L₀	= espessura inicial da amostra, m
L_t	= espessura no tempo t, m
m	= massa da água, $(m_1 + m_2)$, kg
m_c	= massa do corpo, kg
m₀	= massa inicial da amostra, kg
m₁	= massa da água em estado natural, 100g
m₂	= massa da água fria, g
m_p	= massa do produto, g
m_t	= massa no tempo t, kg
M_i	= valor obtido experimentalmente
M_{pi}	= valor predito pelo modelo
PMS	= perda de matéria seca, %
P_v	= pressão de vapor a uma dada temperatura absoluta, Pa
P_{vs}	= pressão de vapor de saturação, Pa
Q_m	= fluxo de massa, $kg \times s^{-1} \times m^{-2}$
r	= número de dados experimentais e simulados

R	= constante universal do gases, $278 \text{ J} \times \text{kg} \times \text{mol}^{-1} \times \text{K}^{-1}$
R_c	= razão do produto/ar, $\text{kg de matéria seca} \times \text{kg}^{-1} \text{ ar seco}$
RX	= razão do conteúdo de água $(X - X_e / X_i - X_e)$
S_b	= encolhimento volumétrico, cm^{-3}
t	= tempo de secagem, h
t_s	= tempo, s
T₀	= temperatura do ar antes da secagem, °C
T₁	= temperatura da água destilada natural, °C
T₂	= temperatura da água fria, °C
T₃	= temperatura da mistura de água em equilíbrio térmico, °C
T₄	= temperatura do feijão, °C
T₅	= temperatura de equilíbrio térmico entre a massa de água e do feijão, °C
T_D	= temperatura do milho, °C
T_e	= temperatura de equilíbrio, °C
T_{abs}	= temperatura absoluta, K
T_f	= temperatura, °F
UR	= umidade relativa do ar, decimal
URX_e	= umidade relativa de equilíbrio para o produto no reumedecimento, %
V	= volume da amostra no tempo t de secagem, cm^3
V₀	= volume inicial da amostra, cm^3
V_{ESP}	= volume específico do ar, $\text{m}^3 \times \text{kg}^{-1} \text{ ar seco}$
V_a	= velocidade do ar, $\text{m} \times \text{s}^{-1}$
x	= distância do ponto de entrada do ar até o grão, m
X	= conteúdo de água do produto, decimal, b. s
X_i	= conteúdo de água inicial, % b. s
X_e	= conteúdo de água de equilíbrio, % b. s.
X_{med}	= média do conteúdo de água das n camadas, % b. s
X₁, X₂	= conteúdo de água de transição, decimal, b. s.
Z	= fator de correção
Y_t	= unidade de tempo, adimensional
Y	= profundidade da camada de sementes, m
W	= razão de umidade do ar, adimensional
W₀	= razão de umidade do ar antes da secagem, $\text{kg de água} \times \text{kg}^{-1} \text{ de ar seco}$

W_f = razão de umidade final do ar depois de ter passado por uma camada de secagem, $\text{kcal} \times \text{kg}^{-1}$ de ar seco

$\Delta h'_{fg}$ = variação do calor latente de vaporização da água no produto, $\text{kcal} \times \text{kg}^{-1}$

Δt = incremento de tempo, h

COEFICIENTES

c_1 = constante de integração

b = constante

k = constante de secagem, s^{-1}

$b_i = (i = 1, \dots, 6)$ = parâmetros que dependem do produto

A, B, D, N = constantes que dependem do produto

LETRAS GREGAS

β = coeficiente de transferência de calor por convecção, $W \times m^{-2} \times K^{-1}$

ρ = massa específica, $kg \times m^{-3}$

α = difusividade térmica, $m^2 \times s^{-1}$

θ_0 = temperatura do grão antes da secagem, $^{\circ}C$

θ = temperatura dos grãos, K

ε = porosidade da massa de sementes, decimal

γ_t = densidade aparente da amostra no tempo t de secagem, $g \times cm^{-3}$

γ_0 = densidade aparente inicial da amostra, $g \times cm^{-3}$

γ_{r0} = densidade inicial da semente, $g \times cm^{-3}$

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Representação esquemática da secagem de uma camada delgada.....	13
2	Equipamento Termoconstante Novasina TH 200	23
3	Calorímetro.....	25
4	Secador experimental utilizado para secagem de camada fina do feijão macassar.....	27
5	Secador experimental em camada estacionário utilizado no experimento.....	28
6	Tela de abertura do software para simulação de secagem de feijão macassar.....	31
7	Tela de entrada de dados para simulação de secagem de feijão macassar em camada espessa pelo modelo de Thompson. e pelo modelo proposto.....	31
8	Dados experimentais e calculados do conteúdo de água de equilíbrio higroscópico dos grãos de feijão macassar.....	33
9	Retas de "Othmer" para determinação do calor latente de vaporização do feijão macassar.....	35
10	Equação calor latente de vaporização do feijão macassar obtida por regressão não linear – Valores observados x Valores calculados.....	37
11	Curva do calor específico do feijão macassar em função do seu conteúdo de água.....	38
12	Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão macassar e calculadas pela equação de Page, para o conteúdo de água inicial de 33% b. s.....	40
13	Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão macassar e calculadas pela equação de Page, para o conteúdo de água inicial de 82% b.s.....	40

14	Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão macassar e calculadas pela equação de Page , para o conteúdo de água inicial de 182% b.s.....	41
15	Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão macassar e calculadas pela equação de Thompson , para o conteúdo de água inicial de 33% b.s.....	41
16	Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão macassar e calculadas pela equação de Thompson , para o conteúdo de água inicial de 82% b.s.....	42
17	Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão macassar e calculadas pela equação de Thompson , para o conteúdo de água inicial de 182% b.s.....	42
18	Superfície de resposta do coeficiente “ n ” da equação de Page em função do conteúdo de água inicial e da temperatura de secagem, obtidas por regressão não linear.....	43
19	Superfície de resposta do coeficiente “ K ” da equação de Page em função do conteúdo de água inicial e da temperatura de secagem, obtidas por regressão não linear.....	43
20	Superfície de resposta do coeficiente “ A ” da equação de Thompson em função do conteúdo de água inicial e da temperatura de secagem, obtidas por regressão não linear.....	44
21	Superfície de resposta do coeficiente “ B ” da equação de Thompson em função do conteúdo de água inicial e da temperatura de secagem, obtida por regressão não linear.....	44
22	Dados experimentais e simulados de secagem em camada espessa do Feijão macassar para temperatura de 52 °C e conteúdo de água inicial de 223 %b.s. pelo modelo proposto.....	47
23	Dados experimentais e simulados de secagem em camada espessa do Feijão macassar para temperatura de 52 °C e conteúdo de água inicial de 223 % b.s. pelo modelo Thompson.....	47
24	Dados experimentais e simulados de secagem em camada espessa do Feijão macassar para temperatura de 28 °C e conteúdo de água inicial de 193 % b.s. pelo modelo proposto.....	48

25	Dados experimentais e simulados de secagem em camada espessa do Feijão macassar para temperatura de 28 °C e conteúdo de água inicial de 193 % b.s. pelo modelo Thompson.....	48
26	Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa do feijão macassar para temperatura de 52 °C e conteúdo de água inicial de 233 % b.s. pelo modelo proposto.....	49
27	Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa do feijão macassar para temperatura de 52 °C e conteúdo de água inicial de 233 % b.s. pelo modelo Thompson.....	49
28	Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa do feijão macassar para temperatura de 28 °C e conteúdo de água inicial de 193 % b.s.pelo modelo proposto.....	50
29	Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa do feijão macassar para temperatura de 28 °C e conteúdo de água inicial de 193 % b.s. pelo modelo Thompson.....	50
30	Dados experimentais e simulados de contração volumétrica da camada durante a secagem em camada espessa do feijão macassar para temperatura de 52 °C e conteúdo de água inicial de 233 % b.s.....	51
31	Dados experimentais e simulados de contração volumétrica da camada durante a secagem em camada espessa do feijão macassar para temperatura de 28 °C e conteúdo de água inicial de 193 % b.s.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1	Conteúdos de água de equilíbrio higroscópico dos grãos de feijão macassar obtidos por dessorção.....	32
2	Umidades relativas de equilíbrio obtidas pela Equação 47 para isotermas de dessorção do feijão macassar em função dos conteúdos de água e temperaturas pré-estabelecidas.....	34
3	Pressão de vapor da água do feijão macassar correspondentes às umidades relativas de equilíbrio obtidas através da Equação 47 para as isotermas de dessorção para os conteúdos de água e temperaturas pré-estabelecidos.....	34
4	Logaritmo neperiano da pressão de vapor da água do feijão macassar correspondente às umidades relativas de equilíbrio obtidas através da Equação 47 para as isotermas de dessorção para os conteúdos de água e temperaturas pré-estabelecidos.....	35
5	Calor latente de vaporização dos grãos de feijão macassar em função da temperatura e conteúdo de água de equilíbrio pré-estabelecido.....	36
6	Calor específico do feijão macassar em função do seu conteúdo de água.....	37
7	Coefficiente da equação de Page obtido para cada temperatura e conteúdo de água inicial estudada.....	39
8	Coefficiente da equação de Thompson obtido para cada temperatura e conteúdo de água inicial estudada.....	39
9	Desvio médio relativo calculado em função dos dados experimentais e simulado para temperatura de 52 °C e conteúdo de água inicial de 233% b.s.....	53
10	Desvio médio relativo calculado em função dos dados experimentais e simulados para temperatura de 28 °C e conteúdo de água inicial de 193% b.s.....	53

11	Desvio médio relativo calculado em função dos dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem para temperatura de 52 °C e conteúdo de água inicial de 233% b.s.....	54
12	Desvio médio relativo calculado em função dos dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem para temperatura de 28 °C e conteúdo de água inicial de 193% b.s.....	54

RESUMO

Neste trabalho foram realizados experimentos de secagem de feijão macassar variedade “manteiguinha”, em camada espessa as temperaturas de 28 e 52 °C, velocidade do ar de secagem de $0,5\text{m}\times\text{s}^{-1}$ e conteúdo de água inicial do produto de 233 e 193% base seca. O objetivo principal desta pesquisa foi comparar os dados experimentais das secagens com os dados simulados pelo modelo de Thompson e pelo modelo proposto por Cavalcanti Mata (2003), onde se considera a contração volumétrica da camada espessa do feijão em função do conteúdo de água.

As equações de balanço de calor e massa para o feijão estudado foram determinadas e introduzidas no programa de simulação SoFeiMa (Software aplicado a simulação de secagem de feijão macassar em camada espessa) desenvolvido por técnicos de informática do Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas.

De acordo com os resultados obtidos conclui-se que: a) Para uma mesma umidade relativa, o conteúdo de água de equilíbrio aumenta com a diminuição de temperatura e pode ser expresso pela equação $X_e = (\ln(1-UR)/-0,009688 \times T^{0,276015})^{0,75530}$ com um coeficiente de determinação de 98,9% ; b) O calor latente de vaporização cresce com a diminuição do conteúdo de água do produto de 25 para 5% base seca e com a diminuição da temperatura de 50 para 20 °C e pode ser representado pela equação $h'_{fg} = (606 - 0,57 \times T) \times (1 + 0,23822 \times \exp(-0,0469 \times X_e))$ com um coeficiente de correlação de 98,7%; c) O calor específico do feijão macassar varia linearmente com o seu conteúdo de água, obtendo-se a seguinte equação $c_p = 0,357 + 0,00178 \times (X_{bu})$, com um coeficiente de determinação de 99,9%; d) A equação proposta por Page para secagem em camada fina é a que melhor representa os dados experimentais com coeficiente de determinação variando de 97,8 a 99,9 %, quando comparada com a equação de Thompson com coeficiente de determinação variando de 96,7 a 99,7 % ; e) Tanto os dados do conteúdo de água do feijão macassar, quanto os dados dos perfis de temperatura simulados pelo SoFeiMa, quando se considera a contração volumétrica da camada tem um desvio médio relativo menor que os dados simulados pelo Modelo de Thompson; f) O tempo de secagem simulado pelo modelo proposto foi o que mais se aproximou do tempo de secagem experimental para as duas temperaturas estudadas ; g) A compatibilidade entre os dados experimentais e os simulados comprovam a validade do modelo proposto por Cavalcanti Mata (2003) para secagem de grãos de feijão macassar variedade “manteiguinha” em camada espessa.

PALAVRAS CHAVES: secagem, modelo, simulação, contração volumétrica.

ABSTRACT

The deep thick layer cowpea, variety “manteiguinha”, drying experiments with initial water contents between 233% and 193%, dry base, were realized using a fixed bed dryer with temperatures of 52 and 28°C, and drying air of $0,5 \text{ m}\times\text{s}^{-1}$, for simulation with Thompson’s model considering the volumetric contraction of the layer. The principal objective of this work was to compare the experimental and the simulated data using Thompson model and CAVALCANTI MATA (2003) proposed model considering the volumetric contraction versus its water content, of the cowpea beans layer.

The equations of heat and mass balance for studied beans were obtained and introduced to the mathematical simulation program SoFeiMa, developed by computing technicians of the Storage and Processing of Product Agricultural Laboratory.

According to the obtained results, it was concluded that: a) To the same relative humidity, the equilibrium water content increases with the decrease of the temperature and can be expressed by the equation: $X_e = (\ln(1-UR)/-0,009688\times T^{0,276015})^{0,75530}$ with the correlation coefficient of 98,9%; b) The latent heat of vaporization increases with the decrease of the water content of the product, from 25 to 5% dry base and with the decrease of the temperature from 50 to 20 °C, and can be represented by the equation $h_{fg} = (606-0,57\times T) \times (1+0,23822\times \exp(-0,0469\times X_e))$ with a correlation coefficient of 98,7%; c) The specific heat of the cowpea beans varies linearly with its water contents, obtaining the follow equation $c_p = 0,357 + 0,00178\times(X_{bu})$ with a correlation coefficient of 99,9%; d) The Page’s equation for thin layer best fits to the experimental data with correlation coefficient varying from 97,8 to 99,9% when compared to Thompson’s equation, with correlation coefficient varying from 96,7 to 99,7%; e) The water content of cowpea beans, and the temperature profiles simulated by SoFeiMa, when the layer volumetric contraction is considered, have less relative mean deviation than the Thompson’s model simulated data; f) The drying time simulated by the proposed model approached better to the experimental data for the two studied temperatures; g) the compatibility between the experimental and simulated data, confirms the validity of the proposed model Cavalcanti Mata (2003) for cowpea beans, variety “manteiguinha”, drying at thick layer.

KEY WORDS: drying, model, simulation, volumetric contraction.

1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento da população mundial e a demanda cada vez maior por alimentos conduzem a necessidade de se aumentar às áreas de produção, bem como a produtividade desses alimentos. Esse aumento de produtividade está diretamente relacionado à necessidade de técnicas e de equipamentos para o manuseio, processamento e armazenamento de grãos e de alimentos de modo geral. A otimização, necessariamente, leva em consideração a compatibilização dos custos envolvidos com a qualidade do produto para os fins que se destina.

Vieira citado por CAVALCANTI MATA (1997), relata que no mundo existem cerca de 20 espécies de leguminosas de grãos utilizadas na alimentação, no entanto as mais importantes são o guandu (*Cajanus cajan*), o feijão-macassar (*Vigna unguiculata*), a ervilha (*Pisum sativum*), a lentilha (*Lens esculenta*), o grão de bico (*Cicer arietinum*), a fava (*Vicia faba*), o amendoim (*Arachis hipogaea*), a soja (*Glicine nax*) e o feijão (*Phaseolus vulgaris*). No Brasil, para alimentação humana, somente o feijão comum e o feijão macassar são realmente importantes; as outras leguminosas têm expressão reduzida como alimento ou são utilizadas como oleaginosos, como é o caso da soja e do amendoim.

No Brasil, o feijão macassar é cultivado predominantemente no sertão semi-árido da região Nordeste e em pequenas áreas na Amazônia. Entretanto, cerca de 95 a 100% do total das áreas plantadas encontram-se nos Estados do Amazonas, Maranhão, Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte. No Nordeste, a produção e a produtividade são de 429.375 t e 303.5 kg/ha, respectivamente. Os maiores produtores são os Estados do Ceará (159.471 t), Piauí (58.786 t), Bahia (50.249 t) e Maranhão (35.213 t), os quais também apresentam as maiores áreas plantadas (IBGE, 1993-2001).

Depois da produção, o feijão necessita ser colhido e seco para que possa preservar sua qualidade ao longo do armazenamento. Nesta etapa existem vários processos que podem ser usados na conservação da qualidade do feijão. Dentre estes, a secagem é o processo mais utilizado para a preservação da qualidade desse produto. A operação consiste na remoção de parte da água contida no produto recém-colhido. O baixo conteúdo de água permite o armazenamento do produto por um período de tempo superior ao que normalmente ocorreria com um produto mais úmido, pelo motivo de evitar a ação de microrganismos e insetos.

Segundo SINÍCIO (1983), o estudo do processo de secagem baseia-se no desenvolvimento de modelos matemáticos para descrever o fenômeno físico, ou seja, no emprego da simulação, visando ao dimensionamento e otimização de secadores. Portanto, o mesmo autor cita Ramirez e diz que a simulação têm sido de extrema importância na descrição e otimização de processos físicos, químicos e biológicos. O seu uso teve uma rápida expansão na década de oitenta, pelo advento e evolução dos computadores.

A construção de modelos matemáticos para expressar a movimentação de líquidos no interior de produtos biológicos tem sido utilizado para o fenômeno de secagem. Contudo, esses modelos não levam em consideração a contração volumétrica da camada. No entanto, CAVALCANTI MATA (2003) tem observado em seus trabalhos anteriores com milho e feijão, que para conteúdos de água inicial elevados (35 a 45% b.u.) existe uma contração volumétrica de cada grão, que reflete em uma redução do volume total da camada de grãos de 25 e 50%, respectivamente.

Giffin citado por MARTINS (1982), relata que a simulação refere-se à operação dinâmica de um modelo de sistema, mantendo alto grau de isomorfismo com os fenômenos do mundo real que ele representa. Quando comparados com a experimentação real, deve encontrar-se bem próxima desta. Portanto, torna-se necessário, conhecer bem os fenômenos de transferência de calor e massa que ocorrem no produto durante o processo.

Considerando a importância da simulação de secagem de feijão em camadas espessas em secadores estacionários a médias e altas temperaturas, bem como a necessidade de obter equações confiáveis que representem o fenômeno de secagem, para condições variáveis de temperatura e umidade do ar, propuseram-se os seguintes objetivos:

- i. Determinar o calor latente de vaporização do feijão macassar variedade "manteiguinha", para as temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C e umidade relativa variando de 10 a 85%.
- ii. Determinar o calor específico do feijão macassar, para conteúdos de água variando de 5 a 185% base seca.

- iii. Determinar uma equação de secagem em camada fina para feijão macassar, com temperaturas do ar de secagem de 30, 40 e 60 °C.
- iv. Determinar um modelo matemático que represente a contração volumétrica da camada espessa do feijão macassar em função do conteúdo de água e do tempo.
- v. Conduzir testes para validação do modelo matemático de Thompson e do modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003), para simulação de secagem em camada espessa de feijão macassar, utilizando as equações específicas de conteúdo de água de equilíbrio, calor latente de vaporização, calor específico, camada fina e contração volumétrica da camada espessa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Considerações gerais

O feijão **macassar** ou **caupi** é a leguminosa granífera, utilizado na alimentação humana, mais cultivada nas áreas semi-áridas do Nordeste brasileiro. É uma espécie rústica bem adaptada às condições de clima e solo da região.

(*Vigna unguiculata* (L) Walp.) é o nome científico do feijão macassar que, dependendo da região, pode ser reconhecido como feijão-de-corda, feijão-de-moita, feijão-de-vara, feijão macassar, feijão fradinho, e feijão verde entre outros. É uma leguminosa comestível dotada de alto conteúdo protéico e de boa capacidade de fixar nitrogênio (FREIRE *et al.*, 1981).

De acordo com GERMANO (1997) a cultura do feijão macassar ocupa lugar de destaque no cenário mundial, nacional e regional, principalmente para os pequenos produtores que praticam a agricultura de subsistência.

Segundo SILVA (1999) o feijão macassar é cultivado em todos os Estados da Região Nordeste, e no Estado da Paraíba tem participação efetiva na dieta da população. Apesar da importância sócio-econômica que representa, as cultivares utilizados são de baixa produtividade, ciclo longo e apresentam desuniformidades quanto ao comprimento da vagem, tamanho, formato e cor da semente.

SILVA (1999), pesquisando sobre o feijão macassar verde comercializado e consumido na cidade de Campina Grande, encontrou feijões no comércio, principalmente nas feiras livres, sob a forma de molhos e/ou debulhados com qualidade e preços bem diversos. Para a formação dos molhos não registrou padronização, tendo sido encontrados molhos de diversos tamanhos, com diferentes números de vagens em diferentes estágios de maturação, tamanhos e formas, como também com mistura de variedades. Concluiu que a representação desse produto é prejudicada por um processo errôneo de colheita, pois não se tem uma referência exata do chamado "ponto de colheita". Os agricultores partem do princípio de que a coloração "verde-palha" indica que o feijão está maduro e vão colhendo as vagens antes de atingirem esse ponto, tendo sido por isso, encontradas vagens ainda em formação como também maduras.

CAVALCANTI MATA *et al.* (1984) estudaram a forma e tamanho dos grãos de feijão macassar e mulatinho quanto à variação da circularidade, esfericidade, comprimento, largura e espessura, em função do conteúdo de água, e concluíram que em ambas as variedades, a esfericidade cresce com o aumento do conteúdo de água, e o comprimento, largura e espessura dos grãos crescem linearmente também com o aumento do conteúdo de água.

2.2. Equações do produto necessárias à simulação de secagem

A simulação do processo de secagem de produtos biológicos em camada espessa, conforme BROOKER *et al.* (1992), envolve um sistema de quatro equações. Três dessas equações são obtidas de balanço de entalpia para o ar e produto e balanço de massa para o ar. A outra equação, que descreve o balanço de massa para o grão, denominada equação de secagem em camada fina.

O conteúdo de água de equilíbrio é definido como sendo a quantidade de massa de água por unidade de massa total (base úmida), que um produto atinge quando é submetido a condições constantes de temperatura e umidade relativa do ar (ROA e ROSSI, 1977).

Já o calor latente de vaporização é a quantidade de energia necessária para vaporizar a água do produto.

O calor específico é dado pela capacidade calorífica do corpo por unidade de massa, sendo que este calor específico é função linear, na maioria dos grãos, do seu conteúdo de água.

2.2.1. Conteúdo de água de equilíbrio

O conceito de conteúdo de água de equilíbrio é importante no estudo de secagem de grãos, porque determina o conteúdo de água mínimo para o qual o grão pode ser seco sob um dado conjunto de condições de secagem. O conteúdo de água de equilíbrio é dependente das condições de umidade relativa e temperatura do ambiente, bem como da espécie, variedade e maturidade do grão (BROOKER *et al.*, 1992).

Basicamente há dois métodos de obtenção experimental de teores do conteúdo de água de equilíbrio: o estático e o dinâmico (CAVALCANTI MATA *et al.*, 1984).

No método estático o grão é levado ao equilíbrio, sem movimentação do ar e também sem movimentação do produto.

No método dinâmico, a atmosfera que envolve os grãos e/ou os próprios grãos estão em movimento.

Os valores de conteúdo de água de equilíbrio dos produtos biológicos dependem, basicamente, de três fatores:

- i. umidade relativa do ar
- ii. temperatura do produto, que é assumida como sendo igual à temperatura do ar
- iii. espécie de grão

A uma determinada umidade relativa do ar corresponde um conteúdo de água do grão, chamado de equilíbrio. Este equilíbrio higroscópico poderá ser obtido quando o ar e o grão estiverem na mesma temperatura. Para cada espécie de grão ou semente pode-se estabelecer uma série de curvas isotérmicas que traduzem este equilíbrio (LASSERAN, 1978).

2.2.2. Calor latente de vaporização

Clausius e Clapeyron, com base em teorias termodinâmicas, desenvolveram uma equação diferencial para a pressão de vapor de um sistema líquido-vapor em equilíbrio. Essa equação foi utilizada em cálculos de pressão de vapor de água contido em sistemas porosos como grãos em equilíbrio com o ar (RODRIGUES-ARIAS, 1963; CASTELLAN, 1976).

$$\frac{dP_v}{dT_{abs}} = \frac{h_{fg} \times P_v}{R \times T_{abs}^2} \quad (1)$$

CAVALCANTI MATA (1997), relata que o processo de determinação do calor latente de vaporização de grãos ainda reside na teoria apresentada por OTHMER (1940). O autor considera o calor latente de vaporização da água uma constante dentro de certo intervalo de temperaturas. Fazendo a integração da Equação 1 tem-se:

$$\ln(P_v) = -\frac{h_{fg}}{R} \times \frac{1}{T_{abs}} + c_1 \quad (2)$$

Considerando-se válida a Equação 1 para a água livre tem-se, neste caso, o valor da pressão como a pressão de saturação (P_{vs}). Desta forma, combinando as duas equações e integrando obtém-se:

$$\ln(P_v) = \frac{h'_{fg}}{h_{fg}} \times \ln(P_{vs}) + c_1 \quad (3)$$

Pelo método de Othmer, os valores de $\ln(P_v)$ para cada tipo de grão são obtidos por meio de curvas de conteúdo de água de equilíbrio, em que, para cada dado conteúdo de água de equilíbrio, a uma determinada temperatura, tem-se a umidade relativa de equilíbrio correspondente (UR). Como $UR = P_v/P_{vs}$ tem-se:

$$P_v = UR \times P_{vs} \quad (4)$$

em que, P_{vs} é obtido por uma equação termodinâmica à mesma temperatura.

Em seguida, são traçados gráficos dos valores de $\ln(P_v)$ em função dos valores de $\ln(P_{vs})$, obtendo-se uma linha reta cujo coeficiente angular é h'_{fg}/h_{fg} . Determinando-se o coeficiente angular e o calor latente de vaporização da água para cada temperatura, conseqüentemente, obtém-se h_{fg} .

O calor latente de vaporização da umidade do milho, segundo Thompson (1972), pode ser determinado pela equação:

$$h'_{fg} = h_{fg} \times [1 + 4,35 \times \exp(-28,25 \times X)] \quad (5)$$

O calor latente de vaporização do arroz pode ser dado pela seguinte equação, desenvolvida por Wang, citado por (NOOMHORM e VERMA, 1986):

$$h'_{fg} = (1795,44 - 0,811 \times T) \times (X)^{-0,346} \quad (6)$$

2.2.3. Calor específico

A quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de um corpo em 1 grau centígrado é a capacidade calorífica deste corpo. O calor específico é a capacidade calorífica por unidade de massa do corpo (TIPLER, 1984).

$$c_p = \frac{C}{m_c} \quad (7)$$

De acordo com ALMEIDA (1979), Os principais métodos usados na determinação do calor específico são:

- i. O uso da relação entre condutividade térmica, massa específica e a difusividade térmica. Este método consiste em determinar a condutividade térmica, a massa específica e a difusividade térmica do corpo, calculando o calor específico pela fórmula:

$$c_p = \frac{C}{\alpha \times \rho} \quad (8)$$

- ii. O processo das misturas
- iii. Calorímetro de varredura diferencial
- iv. Calorímetro de gelo
- v. Bomba calorimétrica

Os métodos “i” e “ii” estão baseados no equilíbrio térmico entre o corpo de calor específico desconhecido e um outro corpo de calor específico já determinado. As descrições destes métodos são encontradas em (CHAKRABARTI e JOHNSON, 1972; DISNEY, 1954; WRATTEN *et al.*, 1969; ALMEIDA, 1979).

De acordo com MOHSENIN (1980) o método mais utilizado para determinação de calor específico de grãos é o método das misturas.

Wright e Poterfield, citados por ALMEIDA (1979) determinaram o calor específico de amendoim em casca, inserindo termopares diretamente nas amêndoas colocadas numa pequena câmara aquecida por meio de resistência elétrica. Compararam os resultados com os que obtiveram simultaneamente pelo método das misturas e concluíram que não houve diferença significativa, ao nível de 1% de probabilidade.

MORAIS (1991), determinou o calor específico do feijão variedade “carioquinha” com variação do conteúdo de água de 16 a 44%, base seca, tendo estabelecido apenas quatro pontos experimentais, obtendo uma relação linear com coeficiente de determinação de 97,67%. A equação encontrada foi:

$$c_p = 1091,141 + 485,369 \times X \quad (9)$$

CAVALCANTI MATA (1997), determinou o calor específico do feijão variedade “carioca” com conteúdos de água variando de 5 a 40%, base seca, tendo estabelecido nove pontos experimentais, obtendo uma relação linear com coeficiente de determinação de 99,86%. A equação encontrada para expressar o calor específico foi:

$$c_p = 947,2975 + 10,70143 \times X \quad (10)$$

2.2.4 Equação de camada fina

A secagem é um processo de transferência simultânea de calor e massa, utilizado para evitar o desenvolvimento de fungos, microorganismos e insetos. Vários produtos biológicos quando estão sendo secos individualmente ou em camada fina, apresentam uma perda de umidade a uma taxa constante durante o período inicial da secagem, seguido por um período de secagem a uma taxa decrescente. Todavia, a secagem de grãos e cereais, geralmente, ocorre inteiramente no período à taxa decrescente.

Segundo MARTINS e CAVALCANTI MATA (1984) no período de secagem à taxa decrescente não devem ser considerados apenas os mecanismos de transferência externos (transferência de calor e massa por convecção), mas também o mecanismo de transferência no interior do produto (difusão de calor e massa). Embora várias teorias tenham sido propostas para prever o comportamento de secagem de grãos durante o período de secagem a taxa

decrecente, somente as relações semi-empíricas e empíricas tem-se mostrado como melhores opções para predizer o processo de secagem.

As equações que descrevem o processo de secagem em camadas finas de grãos e produtos agrícolas podem ser classificadas em teóricas, semiteóricas e empíricas. As teóricas envolvem os fundamentos de balanço de calor e massa que ocorrem durante a secagem. As semiteóricas oferecem um compromisso entre a teoria e a aplicação sem, entretanto, refletirem toda a complexidade do fenômeno. As equações empíricas, obtidas por ajustes estatísticos para as condições experimentais, não explicam bem o processo de secagem, por negligenciarem as propriedades físicas inerentes ao processo, bem como os fundamentos teóricos.

Troeger e Hukill citados por MARTINS (1982), propuseram um modelo de secagem de milho em camada fina:

$$\frac{dX}{dt} = -k \times (X - X_e)^b \quad (11)$$

Os autores também observaram que a eficiência do modelo em predizer os resultados experimentais é aumentada, dividindo-se a curva de secagem em três períodos distintos, ou seja:

$$\frac{dX}{dt} = -b_1(X - X_e)^{b_2}, \quad X_0 \geq X \geq X_1 \quad (12)$$

$$\frac{dX}{dt} = -b_3(X - X_e)^{b_4}, \quad X_1 \geq X \geq X_2 \quad (13)$$

$$\frac{dX}{dt} = -b_5(X - X_e)^{b_6}, \quad X_2 \geq X \geq X_e \quad (14)$$

Outro modelo de ampla aceitação no estudo de secagem em camada fina é o modelo de (PAGE, 1949).

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \exp(-k \times t^n) \quad (15)$$

CAVALCANTI MATA (1997) relata que um melhor entendimento do modelo de Page pode ser conseguido, fazendo-se uma analogia desse com a expressão matemática da lei de resfriamento de Newton. Se t^n é tratado como uma nova variável de tempo, então k é o fator de proporcionalidade para a taxa de secagem:

$$\frac{dX}{d(t)} = -k \times (X - X_e) \times t^n \quad (16)$$

O expoente n pode ser considerado como o fator modificador da variável tempo, refletindo a resistência interna do grão à secagem para determinadas condições, explicando os gradientes de umidade estabelecidos dentro do grão durante a secagem sob a taxa em que ela ocorre. De maneira geral, k reflete o efeito das condições externas e n representa o efeito das mudanças internas ao grão, em função da maneira com que as condições externas são impostas. O modelo de Page tem sido preferido ao modelo logarítmico em trabalhos com soja, girassol e grãos de cereais.

Thompson *et al.* citado por FIOREZE (2004), apresentaram em 1968 um modelo em que colocaram o tempo em função da razão do conteúdo de água do produto na forma de uma exponencial de segunda ordem:

$$t = A \times \ln(RX) + B \times [\ln(RX)]^2 \quad (17)$$

em que, para o milho:

$$A = -1862 + 0,00488 \times T$$

$$B = -427,4 \times \exp(-0,033 \times T)$$

2.3. Secagem em camada espessa

A secagem de um só grão individualmente, ou de uma só camada de grãos, não altera as condições do ar significativamente. Entretanto, quando os grãos são sobrepostos dentro de um secador formando camada espessa, o ar que passa por essa camada se modifica. Sua temperatura diminui ao ceder calor para os grãos e sua umidade aumenta ao receber a água

evaporada do produto. Conseqüentemente, seu potencial de secagem diminui. Um modelo matemático completo que possa simular o processo de secagem nessa situação deve conter equações que calculem todas as variações de temperatura e umidade, tanto para o produto como para o ar (VILELA, 1977).

2.3.1 Modelos de secagem em camada espessa

a) Modelo de Hukill

Hukill citado por QUEIROZ *et al.* (1985), foi o primeiro pesquisador a desenvolver um modelo para simulação de secagem em camada espessa, baseando-se em uma equação de umidade do produto em função da espessura da camada e do conteúdo de água. Posteriormente, surgiram outros modelos mais complexos, porém a facilidade de uso contribuiu para que o modelo de Hukill continuasse sendo utilizado na análise de secagem de grãos.

O modelo de Hukill é baseado em uma expressão analítica que determina a umidade do grão (equação 18), relacionando com a altura total da camada e com o tempo de secagem, desprezando o calor sensível e admitindo que a temperatura do ar de secagem decresce exponencialmente à medida que o ar vai passando através da massa de grãos (MARTINS *et al.* 1984).

$$RX = \frac{2^D}{(2^D + 2^Y - 1)} \quad (18)$$

A unidade de tempo, Y_1 , é calculada pela seguinte expressão:

$$Y_t = \frac{t}{H} \quad (19)$$

Segundo Queiroz *et al.* citado por CAVALCANTI MATA (1997), o tempo de meia-resposta (H) pode ser determinado por meio de regressão linear, BROOKER *et al.* (1974), estabeleceram a seguinte equação para milho:

$$H = \exp(2,413 - 0,016 \times X_{bu} + 0,0003 \times T - 0,001 \times X_{bu} \times T) \quad (20)$$

Há também um fator de profundidade (D_p) que contém uma quantidade de matéria seca, MS, determinada pela equação de balanço de energia, fazendo o tempo t igual ao tempo de meia resposta H , ou seja:

$$D_p = \frac{x \times \rho \times h'_{fg} \times (X_i - X_e)}{G_{ar} \times c_{ar} \times H \times (T_0 - T_e)} \quad (21)$$

b) Modelo de Thompson

THOMPSON *et al.* (1968) desenvolveram um modelo para simulação de secagem de milho em camada espessa, baseado em equações de balanço de calor e massa. O processo de secagem foi dividido, para efeito de simulação, em várias etapas. Assim, a camada espessa de grãos era dividida em subcamadas finas sobrepostas uma às outras. As variações nas condições do ar e do grão, em cada subcamada, eram calculadas com base em pequenos incrementos de tempo. A Figura 1 apresenta um esquema das variações consideradas na simulação de secagem de uma camada fina, durante determinado intervalo de tempo Δt uma quantidade de umidade ΔX é evaporada e transportada pelo ar, que aumenta a razão de umidade W para $W + \Delta W$. durante a secagem, a temperatura do ar diminui de um valor ΔT proporcional ao aumento da temperatura do grão, $\Delta \theta$, e ao resfriamento evaporativo, que acompanha a remoção da umidade.

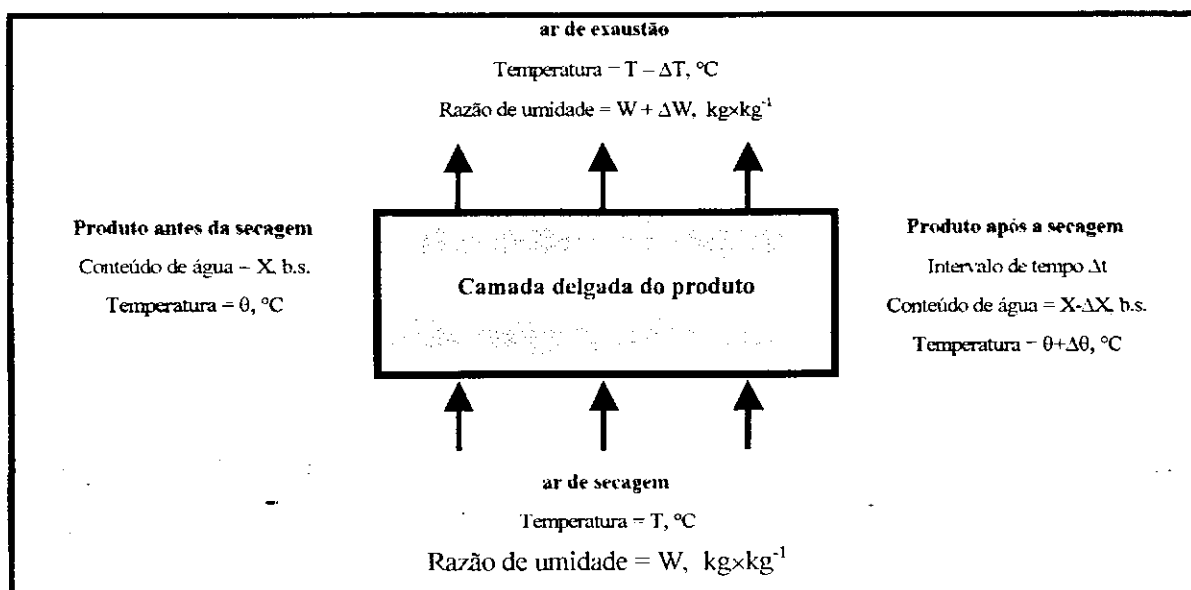


Figura 1 – Representação esquemática da secagem de uma camada delgada.

Para o desenvolvimento do modelo, simula-se uma a uma das camadas delgadas, mediante um balanço de calor e massa, feitas as seguintes suposições:

i. A secagem em camada delgada é representada pela Equação 17.

ii. Conteúdo de água de equilíbrio – o conteúdo de água de equilíbrio do produto, para determinada condição do ar de secagem, é dado por:

$$X_e = \left[\frac{-\ln(1-UR)}{(A \times (T_e + B))} \right]^{\frac{1}{N}} \quad (22)$$

iii. O calor latente de vaporização da água no grão é representado pela equação:

$$h'_{fg} = (2502,2 - 2,39 \times T) \times (1,0 + A \times \exp(B \times X)) \quad (23)$$

iv. O calor específico do produto é representado pela equação:

$$c_p = (A + B \times X) \times R_c \quad (24)$$

$$R_c = \rho \times \frac{h}{n} \times \frac{V_{esp}}{G_{ar} \times \Delta t \times 60} \quad (25)$$

v. Temperatura de equilíbrio do ar de secagem

THOMPSON *et al.* (1968) determinaram a temperatura de equilíbrio, a partir da equação de balanço de calor, fazendo uso da temperatura do ar de secagem.

$$T_e = \frac{(0,24 + 0,45W_0) \cdot T_0 + c_p \theta_0}{(0,24 + 0,45W_0 + c_p)} \quad (26)$$

vi. Conteúdo de água removido

Para determinar a quantidade de água removida de cada camada, é necessário conhecer o conteúdo de água inicial do produto e a temperatura do ar de saída. O conteúdo de água de equilíbrio do produto (X_e) é calculado pela Equação 22 usando a temperatura de equilíbrio da Equação 26, e a umidade relativa do ar, por meio da temperatura de equilíbrio e da razão de mistura do ar W_0 , que está entrando na camada de grãos.

A quantidade de água perdida pelo produto no intervalo de tempo Δt é calculada pela Equação 27 de camada delgada :

$$t_{eq} = A \times \ln(RX) + B \times [\ln(RX)]^2 + \Delta t \quad (27)$$

Aplica-se este tempo equivalente (t_{eq}) na raiz da equação, obtendo-se o conteúdo de água final, depois de o ar ter passado pela camada delgada (CAVALCANTI MATA, 1997).

$$X_f = \exp\left(\frac{-A - \sqrt{A^2 + 4 \times t_{eq} \times B}}{2 \times B}\right) \times (X_i - X_e) + X_e \quad (28)$$

As condições finais do ar, após o intervalo de tempo Δt , são calculadas das seguintes formas:

$$\Delta W = \frac{(X_i - X_e)}{100} \times Rc \quad (29)$$

$$W_f = W_0 - \Delta W \quad (30)$$

vii. A temperatura final do ar e do produto é dada por:

$$T_f = \frac{(0,24 + 0,45 \times W_0) \times T_0 - \Delta W \times (587,9 + \Delta h'_{fg} - c_a \times \theta_e) + c_{pm} \times \theta_e}{(0,24 + 0,45 \times W_f + c_{pm})} \quad (31)$$

viii. Ponto de estado inexistente do ar de secagem

Depois de cada balanço de calor, é necessário determinar se a temperatura e a umidade absoluta do ar existem, isto é, se a umidade relativa do ar determinada matematicamente é inferior a 100%. Se o ponto de estado não existir, é necessário efetuar outro balanço de calor para simular a condensação da água do ar no grão (THOMPSON *et al.* 1968).

Do ponto de estado inexistente (representado por H_0 , G_0 e T_0), o balanço de calor é escrito entre as condições iniciais e finais, por acréscimo do período de secagem.

$$\begin{aligned} [0,24 \times T_0 + W_0 \times (1060,8 + 0,45T_0) + c_p \times \theta_0 + (W_f - W_0) \times (c_w \times \theta_0)] = \\ [0,24 \times T_f + W_f \times (1060,8 + 0,45 \times T_f) + c_p \times T_f] \end{aligned} \quad (32)$$

Essa equação tem duas incógnitas: a temperatura final, T_f , e a razão de mistura do ar de exaustão, W_f . Interpolando-se a umidade relativa versus a relação de temperatura, esta converge para 100% de umidade relativa. Com apenas 3 ou 4 tentativas, obtém-se uma umidade relativa entre 99 e 100%. Deste modo, Thompson assumiu que a água que é removida do ar é condensada no produto e conteúdo de água final (X_f), é determinada por:

$$X_f = X_i - \left[\frac{(W_f - W_0) \times 100}{R_c} \right] \quad (33)$$

c) Modelo de Morey

MOREY *et al.* (1978) verificaram experimentalmente, que a secagem das camadas inferiores não acontecia tão rápido quanto previa o modelo de Thompson em sua forma original. Fazendo-se necessário a incorporação de uma equação empírica no modelo de secagem em camada delgada, modificada especialmente para o grão em estudo para prever a sua perda de umidade, uma vez que o produto não estava em equilíbrio com o ar como admite o modelo.

$$RX = \exp \left[-k \times t^{0,664} \right] \quad (34)$$

em que,

$$k = \exp(-x \times t^Y) \quad (35)$$

e

$$x = [6,0142 + 1,453 \times 10^{-4} \times (\text{UR})^2]^{0,5} - (1,6 \times T + 32) \times [3,323 \times 10^{-4} + 3,0 \times 10^{-8} \times (\text{UR})^2]^{0,5} \quad (36)$$

$$Y = 0,12264 - 1,461 \times 10^{-3} \times \text{UR} + 4,14 \times 10^{-5} \times \text{UR} \times T_0 - 1,044 \times 10^{-4} \times T_0 \quad (37)$$

No caso de secagem a baixas temperaturas é comum ocorrer o reumedecimento do produto nas camadas superiores. MOREY *et al.*, (1976) mostraram que o fenômeno de histerese deveria ser considerado, pois o valor da umidade no reumedecimento é sempre inferior ao previsto pelo modelo de Thompson.

Desta forma, a equação que representa a absorção de umidade para o milho, é dada por:

$$\text{URX}_E = 100 \times \{1 - \exp[-0,518(0 + 45,6) \times X^{1,72}]\} \quad (38)$$

em que,

URX_e = umidade relativa de equilíbrio para o produto no reumedecimento, %.

O modelo de Morey também prevê a perda de matéria seca do produto, dada pela deterioração do mesmo quando processado a baixas temperaturas, expressa por:

$$\text{PMS} = 0,00883 \times [\exp(0,006 \times t) - 1] + 0,00102 \times t \quad (39)$$

em que,

PMS = perda de matéria seca, %, de milho com umidade de 25% b.u., temperatura de 15,6°C e 30% de danos;

d) Modelo de Michigan

O modelo de Michigan proposto por BAKKER-ARKEMA *et al.* (1974) baseia-se na transferência simultânea de energia e de massa entre o ar de secagem e um volume diferencial de grãos, localizado numa posição da camada espessa. Esse modelo é composto de um sistema de quatro equações diferenciais parciais. A umidade pode ser obtida, usando-se uma equação empírica de secagem em camada delgada ou um modelo matemático capaz de prever o fluxo de água no interior dos grãos.

i) A equação que expressa o balanço de energia do ar, é dada por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{h \times a \times (T - \theta)}{\varepsilon \times \rho_a \times (c_a + c_v \times W)} - \frac{V_a}{\varepsilon} \times \frac{\partial T}{\partial Y} \quad (40)$$

ii) A equação que expressa o balanço de energia dos grãos, é dada por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{h \times a \times (T - \theta)}{\rho_p \times (c_p + c_a \times X)} - \frac{h'_{fg} + c_v \times (T - \theta)}{\rho_p \times (c_p + c_a \times X)} \times Q_a \times \frac{\partial W}{\partial Y} \quad (41)$$

iii) A equação que expressa o balanço de massa do ar, é dada por:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon \times \rho_a} \times \left[Q_a \times \frac{\partial W}{\partial Y} + \rho_p \times \frac{\partial X}{\partial t} \right] \quad (42)$$

iv) A equação que expressa o balanço de massa dos grãos, é dada por:

O balanço de massa dos grãos é dado pela equação de secagem em camada delgada apropriada, sugerida por (THOMPSON *et al.* 1968).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{(X - X_e)}{3600 \times \sqrt{A^2 + (1/900) \times B \times t}} \quad (43)$$

2.3.2 Contração volumétrica/encolhimento

Teoricamente os fatores que controlam a taxa de secagem nos períodos de taxa constante e decrescente são diferentes. No período de taxa constante são a temperatura, a velocidade e a umidade relativa do ar. No período decrescente, estes fatores são a temperatura do ar e a espessura do alimento, enquanto a velocidade e a umidade relativa do ar não afetam a taxa de secagem (RIZVI, 1986; FELLOWS, 1988).

Além dos fatores descritos anteriormente, o encolhimento é um dos principais fatores que acontecem no alimento durante a secagem. Ele ocorre simultaneamente à remoção de água. Aregba e Puigalli; Balaban; Mulet; Berna e Rosseló; Kechaou e Roques; Vagenas e Marinos-Kouris citados por QUEIROZ e NEBRA, (2001) relatam que o encolhimento ou contração volumétrica foi tratado teoricamente de diversas maneiras na literatura. Para alguns autores, o encolhimento pode ser relacionado diretamente ao volume da água removido durante o processo.

KILPATRICK *et al.* (1955) propuseram uma equação empírica simples que formulasse uma relação entre variações na área de superfície e o conteúdo de água de vegetais durante a secagem. A correlação proposta requer um conhecimento prévio do conteúdo de água e da densidade inicial do material seco. A aplicação aos estágios adiantados da secagem revelou que o encolhimento ocorre aproximadamente igual à quantidade da água evaporada.

HERNANDEZ *et al.* (2000) propuseram uma relação linear para o encolhimento dos alimentos em função do conteúdo de água, com base em trabalhos anteriores de que há uma relação direta entre o conteúdo de água e as propriedades físicas.

Vários pesquisadores procuraram correlacionar as taxas decrescentes de diferentes matérias com o encolhimento e propuseram modelos que conciliassem estes fenômenos:

HAWLADER *et al.* (1991) estudaram as características de secagem de fatias de tomate, usando um secador de bandeja com condições controladas de temperatura e fluxo de ar. Esses pesquisadores utilizaram apenas o primeiro termo da solução em série da 2ª Lei de Fick.

A temperatura da amostra e o efeito da contração de volume foram relacionados ao conteúdo de água da amostra e o seguinte modelo de encolhimento em função de perda de água foi proposto:

$$L_t = L_0 \times \left(\frac{m_t}{m_0} \right)^j \quad (44)$$

Perez e Calvelo, citado por WANG e BRENNAN (1996) propuseram um modelo para alteração do volume, ou encolhimento que durante a secagem pode ser relacionado com a densidade do material, através de um balanço de massa dos sólidos secos:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\lambda_0 \times (1 + X)}{\lambda_t \times (1 + X_i)} \quad (45)$$

PRADO *et al.* (2002), com a finalidade de obterem uma representação matemática do fenômeno do encolhimento durante a secagem de sementes de mamão, em leito fixo, as temperaturas de 32 e 50 °C, utilizaram-se do modelo proposto (Equação 46) por SUZUKI *et al.* (1976) e concluíram que o encolhimento das sementes apresentou uma dependência linear com o conteúdo de água.

$$S_b = \left(\frac{\lambda_{r0}}{X_i + 1} \right) \times X - \lambda_{r0} \times X_i \quad (46)$$

2.3.3. Simulação

Segundo ROSKO (1972), o procedimento de desenvolvimento da simulação é chamado de projeto de simulação. O desenvolvimento da simulação compreende um conjunto de procedimentos, através de tarefas individuais e quando concluído é examinado com a finalidade de replicar adequadamente a dinâmica do sistema físico. Durante a fase de teste e avaliação da simulação alguns ajustes devem ser especificados para se atingir um grau de refinamento satisfatório. O projeto de simulação envolve quatro etapas, a saber:

- i – Sistema: Consiste no isolamento do sistema a ser simulado, especificando as variáveis de entrada e de saída relativas à causa e efeito.

- ii – Modelo matemático: Consiste na especificação de equações e parâmetros relacionados as entradas e saídas do sistema. Uma das formas de estimar os parâmetros se caracteriza por medições em um sistema existente, através de um trabalho experimental.
- iii – Modelo de simulação: consiste no desenvolvimento de um modelo discreto equivalente ao modelo matemático contínuo e na obtenção de um conjunto de equações que pode ser programado em um computador.
- iv – Simulação: Consiste no teste e avaliação do modelo de simulação programado, proporcionando condições para a determinação de ajuste das etapas anteriores. O sistema físico pode ser usado para testar a simulação através de comparação com dados obtidos de ambas ferramentas. O modelo matemático é alterado, conseqüentemente o modelo de simulação e a simulação são alterados. O procedimento é repetido até atingir um erro desprezível. Quando a simulação chega a esta condição significa que o projeto está completo.

Segundo BAKKER-ARKEMA *et al.* (1974), a primeira tentativa importante de modelamento de secagem de grãos em camada espessa foi feita por Hukill em 1954. Todavia, o primeiro estudo significativo, baseado nas leis de transferência de calor e massa, foi publicado por Van Arsdell em 1955. Naquela época, o trabalho não teve possibilidade de ser utilizada devido a não existência de computador eletrônico adequado.

Comparando os modelos matemáticos para simulação de secagem de milho a baixa temperatura, SINÍCIO *et al.* (1986) concluíram que todos os modelos são equivalentes entre si, do ponto de vista da engenharia, desde que se tenham equações confiáveis para descrever as propriedades físicas do produto, principalmente equações de secagem em camadas finas e de umidade de equilíbrio.

TASCON (1984) desenvolveu um programa para simulação de secagem de café, para secador de camada estacionária, com inversão de sentido de fluxo de ar, a partir do modelo proposto por Thompson, visando otimizar esse secador de camada estacionária. Foram realizadas secagens às temperaturas de 50, 60 e 70 °C, fluxo de ar de 12 e 15 m³ × min⁻¹ × m⁻² e os tempos de inversão de fluxo de ar de 7,9 e 12 horas. Concluiu que a inversão do sentido do

fluxo de ar apresenta vantagem sobre o sistema convencional apenas no aspecto de melhoramento da homogeneidade da umidade final da camada do produto, pouco alterando a eficiência de secagem, comportando-se satisfatoriamente dentro dos parâmetros estudados.

CAVALCANTI MATA (1998) também utilizou o modelo de THOMPSON *et al.* (1968) para simular a secagem de grãos de milho branco, variedade BR-451, em secador de camada estacionária. O autor conduziu a secagem em secador experimental às temperaturas de 40, 60 e 80 °C, altura da camada de grãos de 0,60 m e velocidade do ar de secagem de $36\text{m}^3 \times \text{min}^{-1} \times \text{m}^{-2}$, tendo concluído que os erros relativos entre os dados experimentais e os dados calculados foram baixos, o que permite validar o modelo para esse produto.

3. MATERIAL E METODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA) do Departamento de Engenharia Agrícola e no Laboratório de Transferência em Meios Porosos (LTMP) do Departamento de Engenharia Química, ambos do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande –PB.

Para realização desta pesquisa foram utilizados grãos de feijão macassar variedade “manteiguinha”, adquiridos no comércio local da cidade de Campina Grande – PB.

3.1. Equações do produto necessárias a simulação de secagem

Nesta fase do trabalho foram adquiridos 4 kg de feijão debulhados, os quais foram acondicionados (conteúdo de água de 186 % b.s.) em dois sacos plásticos sobrepostos, para evitar a troca de umidade com o ambiente, e foram armazenados a frio, a uma temperatura de aproximadamente 1°C, a fim de manter as características do feijão até a realização do experimento.

3.1.1. Determinação das isotermas de equilíbrio higroscópico

Para determinação do equilíbrio higroscópico do feijão macassar foi utilizado o equipamento Termoconstante Novasina TH200 (Figura 2), com temperatura controlada.

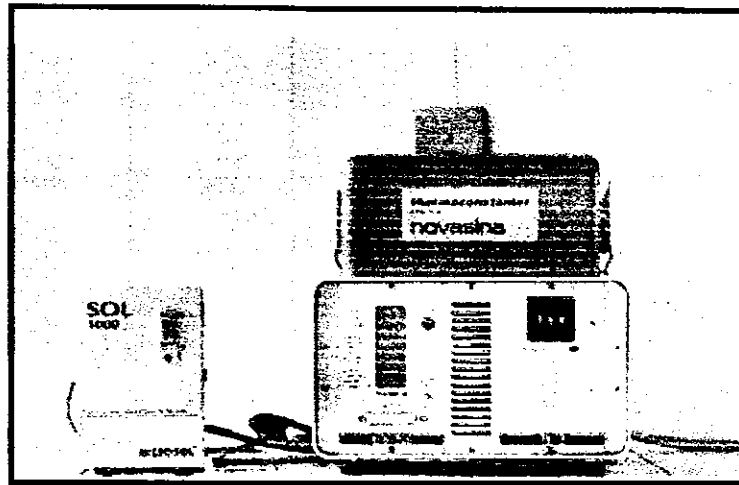


Figura 2 – Equipamento Termoconstanter Novasina TH 200.

Para ajuste dos dados experimentais foi utilizada a equação de Henderson modificada por CAVALCANTI MATA (1997).

$$1 - UR = \exp [-A \times (T^B) \times (X_e^N)] \quad (47)$$

3.1.2. Calor latente de vaporização

Com os dados obtidos das isotermas de dessecção do feijão e calculados os parâmetros da Equação 48. foram determinadas os valores de umidade relativa de equilíbrio para os conteúdos de água de 5, 10, 15, 20 e 25 % b.s., às temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C.

Com os valores das umidades relativas de equilíbrio foram determinadas as pressões de vapor de equilíbrio P_v , utilizando a expressão $P_v = UR \times P_{vs}$ em que, segundo WILHELM (1976), P_{vs} pode ser estimado por:

$$P_{vs} = \exp \left[\frac{-7511,52}{T_{abs}} + 89,63121 + 0,02399897 \times T_{abs} - 12,150799 \times \ln(T_{abs}) \right. \\ \left. + 2,0998405 \times 10^{-11} \times (T_{abs})^4 - 1,1654551 \times 10^{-5} \times (T_{abs})^2 - 1,2810336 \cdot 10^{-8} \times (T_{abs})^3 \right] / 0,1333 \quad (48)$$

Com os valores de $\ln(P_v)$ e $\ln(P_{vs})$ foram feitas regressões lineares de modo a calcular os coeficientes angulares para cada conteúdo de água de equilíbrio. Os coeficientes angulares das retas correspondem à relação h'_{fg}/h_{fg} , para a qual tem-se:

dessa forma $h'_{fg} = h_{fg} \times \text{coef. Angular}$

em que,

$$h_{fg} = 606 - 0,57 \times T \quad (49)$$

Obtidos os valores de h'_{fg} , estes foram correlacionados com as temperaturas e os conteúdos de água de equilíbrio, por meio de regressão não linear usando o programa computacional STATISTICA 5.0 (1995), sendo a equação de ajuste expressa da seguinte forma:

$$h'_{fg} = (606 - 0,57 \times T) \times (1 + A \times \exp(B \times X_f)) \quad (50)$$

3.1.3. Calor específico

Determinou-se o calor específico para sete níveis de conteúdo de água (5, 18, 33, 54, 82, 122 e 186% b.s.) do feijão macassar variedade “manteiguinha”, com três repetições, utilizando-se amostras de 100g, aproximadamente, pelo método das misturas.

3.1.3.1. Determinação do calor específico do feijão em função dos conteúdos de água

Para determinação do calor específico dos grãos de feijão foi utilizado o método das misturas. Nesse método, o feijão com massa e temperatura conhecida é colocado em um calorímetro (Figura 3) contendo água destilada com temperatura, massa e calor específico conhecido. O calor específico desconhecido é determinado pela equação de balanço de calor, entre o calor ganho ou perdido pelo material. Para essa determinação foi utilizado um calorímetro construído no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, utilizando-se uma garrafa térmica envolvida por uma camada de lã de vidro, colocada dentro de um tubo de PVC. Um termômetro digital foi utilizado para medir a temperatura no interior da garrafa térmica.

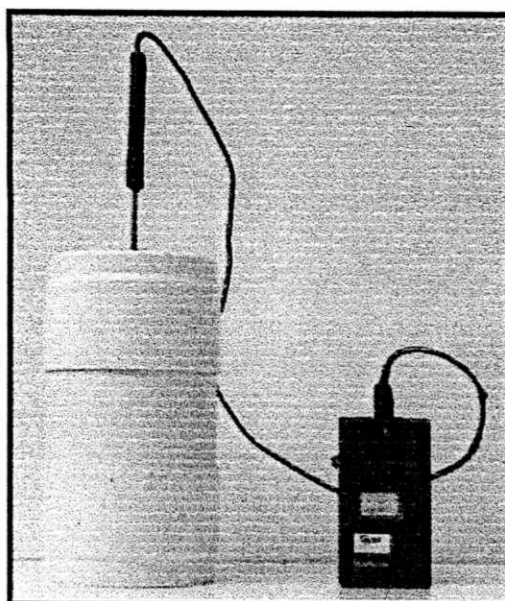


Figura 3 – Calorímetro utilizado para determinação do calor específico.

3.1.3.2. Determinação da capacidade calorífica do calorímetro

Para determinação da capacidade do calorímetro, colocou-se 100g de água destilada natural dentro do calorímetro. Este foi fechado com uma rolha de borracha acoplada a um termômetro que indicava uma temperatura T_1 no interior do calorímetro. Em seguida colocou-se no recipiente mais 100g de água destilada a uma temperatura de $2\text{ }^\circ\text{C}$, correspondente à temperatura T_2 . Agitou-se o calorímetro durante determinado tempo (aproximadamente 240 s) até que fosse alcançada uma temperatura T_3 . A capacidade calorífica do calorímetro foi então determinada pela equação:

$$c_a \times m_1 \times (T_1 - T_3) + c_{\text{cal}} \times (T_1 - T_3) = c_a \times m_2 \times (T_3 - T_2) \quad (51)$$

Conhecidas a capacidade calorífica do calorímetro e a temperatura de equilíbrio (T_3) determinou-se a temperatura da amostra de feijão (T_4). Em seguida colocou-se esta amostra no calorímetro e agitou-se até que um novo equilíbrio térmico fosse alcançado a uma temperatura T_5 . O calor específico do feijão foi determinado pelo seguinte balanço de energia:

$$m_p \times c_p \times (T_4 - T_5) = c_1 \times m \times (T_5 - T_3) + c_{\text{cal}} \times (T_5 - T_3) \quad (52)$$

3.2. Secagem em camada fina

Dos grãos de feijão que foram acondicionados em saco plástico e colocados em refrigerador à temperatura de 1 °C, foi determinado o seu conteúdo de água inicial, utilizando-se uma estufa de circulação de ar do tipo FANEN 330, a temperatura de 105 ± 1 °C por um período de tempo de 24 horas, também foi determinado o conteúdo de água do feijão após a secagem pelo mesmo método.

Determinado o conteúdo de água, os grãos eram retirados dos sacos plásticos, que estavam no refrigerador, e colocados no ambiente até que atingissem o equilíbrio térmico com o meio.

Posteriormente, uma amostra de 256 gramas do grão era colocada em um secador experimental localizado no Laboratório de Transferência em Meios Porosos do DEQ com sistema pré-estabilizado para temperatura e velocidade do ar desejado (Figura 4).

Os testes de secagem do feijão macassar em camada fina foram realizados às temperaturas de 30, 40 e 60 °C com conteúdos de água inicial de 33, 82 e 182%, em base seca e velocidade do ar de secagem de 0,5 m/seg para todos os teste.

A diminuição do conteúdo de água com o tempo, para cada temperatura estudada, foi acompanhada por meio da perda de peso, conhecendo-se o conteúdo de água inicial. A balança utilizada para este acompanhamento foi uma balança Mettler PC 440, com precisão de 0,01 grama.

Para ajustar as equações de secagem em camada fina foram utilizados os modelos propostos por Page e Thompson. A determinação dos coeficientes dessas equações foi feita por regressão não linear utilizando o programa (STATISTICA 5.0, 1995).

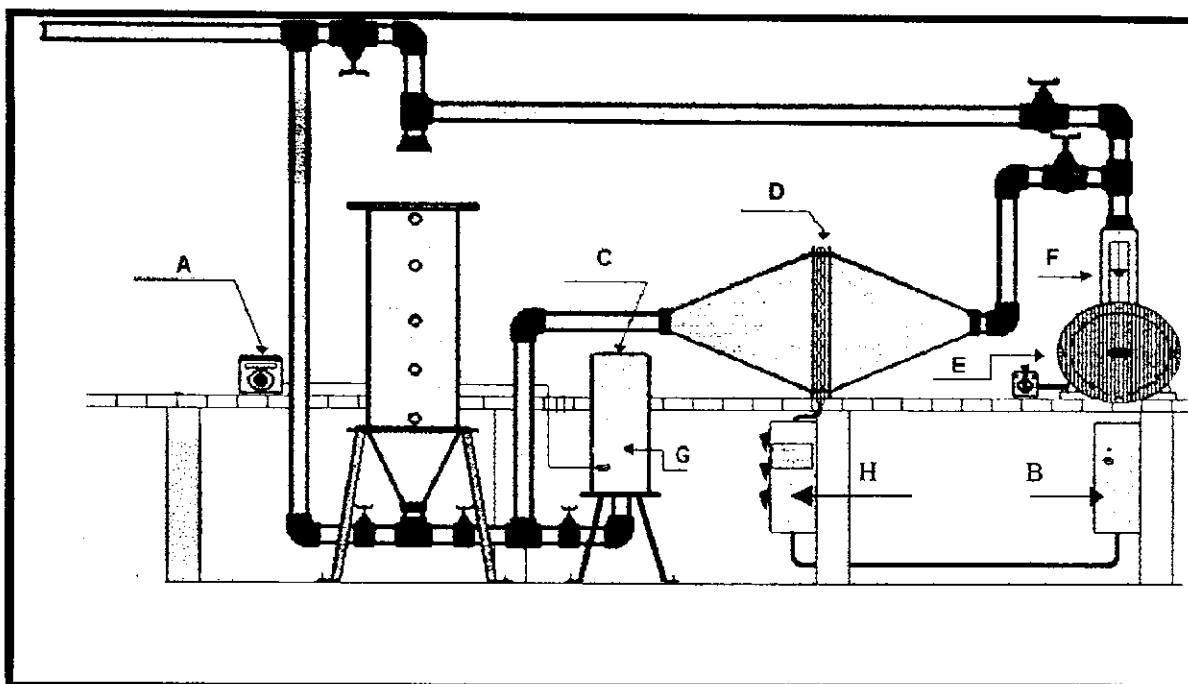


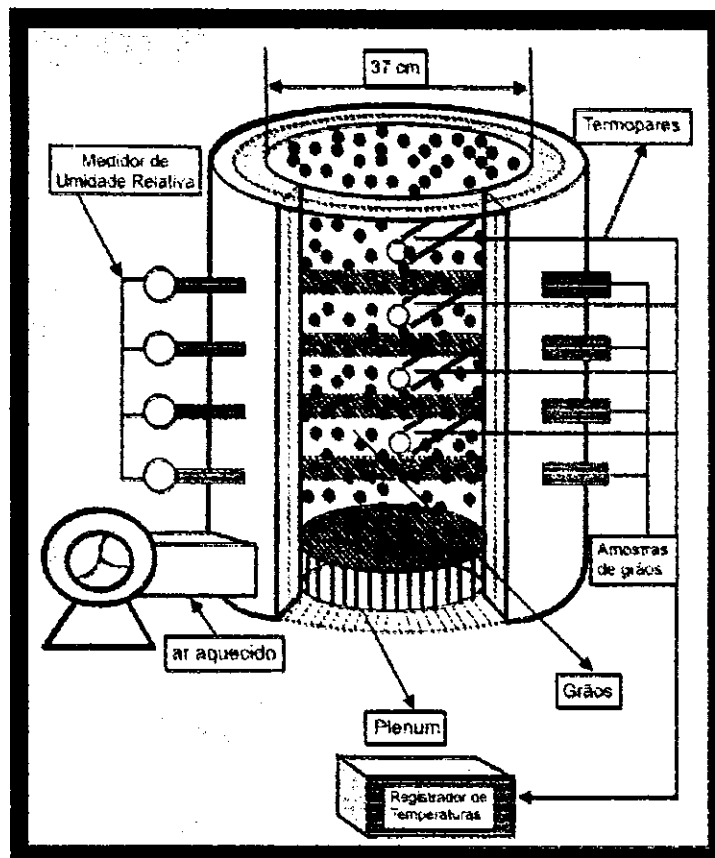
Figura 4 – Secador experimental utilizado para secagem em camada fina do feijão macassar: (A - controlador de temperatura, B – chave principal, C - coluna de secagem, D - sistema aquecedor, E - Ciclone, F- rotômetro, G – termopar, H – chave seletora de resistência).

3.3 Secagem em camada espessa

Esta etapa do trabalho foi realizada no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande.

Para realização deste experimento utilizou-se em média 40 kg de feijão macassar variedade “manteiguinha” para cada secagem, realizaram-se dois testes de secagem em camada espessa às temperaturas de 28 e 52 °C e conteúdo de água de 193 e 233%, em base seca.

A secagem foi realizada utilizando-se um secador experimental de leito fixo e camada espessa (Figura 5) com ar de secagem fornecido por um ventilador, que conduzia o ar até o plenum, em que era distribuído pela camada de grãos.



Fonte: CAVALCANTI MATA 1997

Figura 5 – Secador experimental em camada estacionário utilizado no experimento.

Para cada teste de secagem determinou-se inicialmente o conteúdo de água do feijão, utilizando-se uma estufa de circulação de ar do tipo FANEN 330, temperatura de $105 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ por um período de tempo de 24 horas.

As temperaturas, umidades relativas e perda de peso das amostras de cada camada foram determinadas de 60 em 60 minutos.

As condições ambientais de temperatura do bulbo seco e umidade relativa do ar foram registradas continuamente por um termohigrógrafo do tipo IH, instalado no local em que ocorreram os testes de secagem.

A diminuição do conteúdo de água com o tempo foi determinada por meio da perda de peso, conhecendo-se o conteúdo de água inicial. A balança utilizada para este acompanhamento foi uma balança Mettler PC 440, com precisão de 0,01 grama.

A umidade relativa do ar de secagem foi medida através de higrômetros que permaneceram dentro do secador durante a secagem.

As temperaturas do ar na saída do secador, no interior (distribuídos em vários pontos da camada de grãos) e na entrada de ar, foram registradas por um aparelho eletrônico multi-registrador de temperatura, em que foram conectados termopares (5 no total) instalados nos referidos pontos.

A contração volumétrica da camada espessa durante a secagem foi determinada de 60 em 60 minutos, utilizando-se um paquímetro.

3.4 Simulação de secagem

Implementou-se um programa, desenvolvido em Dhelfi IV no Laboratório de Armazenamento e Processamento e de Produtos Agrícolas, para simulação de secagem de produtos agrícolas em camada espessa, em secador de camada estacionaria. O programa foi denominado SoFeiMa (Software aplicado à secagem de feijão macassar em camada espessa) versão 1.0, sendo que os programas fontes estão no Apêndice A. O programa elaborado contém duas opções: Uma opção para simulação de secagem de feijão macassar pelo modelo de Thompson (1967) e a outra opção de simulação para secagem do feijão macassar pelo modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003), onde, leva-se em consideração a contração volumétrica da camada espessa.

a) Modelo de Thompson

- i. Equilíbrio higroscópico - X_e
- ii. Calor latente de vaporização da água do produto - h'_{fg}
- iii. Calor específico - c_p
- iv. Equação de camada fina

b) Modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003).

No modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003) à base do modelo de Thompson, foi introduzida a Equação 53 da contração volumétrica da camada espessa obtida através de regressão não linear em função do conteúdo de água.

i. Equação de contração volumétrica da camada - Cv

$$Cv = h_i - \left(\left(\left(100 - \frac{X_{med}}{X_i} \right) \div Z \right) \times h \right) \div 100 \quad (53)$$

3.4.1 Teste do modelo

O critério usado para testar os modelos, foi o desvio médio relativo P(%) que é definido como a diferença relativa entre os valores experimentais e os simulados, sendo considerado preditivo, modelos que apresentem valores de P menores que 10% (LOMAURO *et al.*, 1985), conforme descritos a seguir:

$$P = \frac{100}{r} \times \sum_{i=1}^n \frac{|M_i - M_{pi}|}{M_i} \quad (54)$$

3.4.2 Apresentação do programa

O programa é constituído de uma tela de abertura para apresentação em que no menu principal encontra-se a opção simulação (Figura 6). A tela seguinte (Figura 7) proporciona que se escolha qual processo de simulação será utilizado.

Posteriormente, será escolhido, caso seja utilizado, a temperatura do bulbo seco (**Tb.s.**) e temperatura do bulbo úmido (**Tb.m.**) ou temperatura do bulbo seco (**Tb.s.**) e umidade relativa (**UR**) do ar.

Para se efetuar a simulação devemos dispor dos seguintes dados: número de camadas, pressão atmosférica do ar, temperatura do ar aquecido, umidade inicial, umidade final, fluxo de ar, altura da camada e o incremento de tempo da secagem. Em seguida dando um clique no botão calcular dentro desta mesma tela (Figura 6) observa-se uma tabela onde se dispõe dos dados simulados.



Figura 6 – Tela de abertura do software para simulação de secagem de feijão macassar

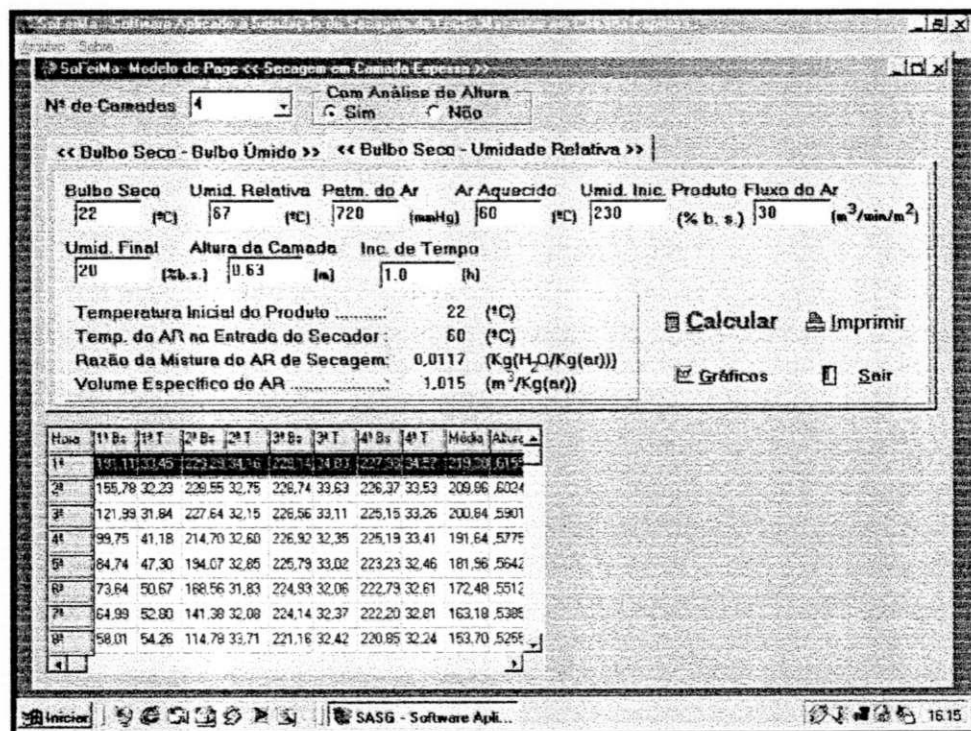


Figura 7 – Tela de entrada de dados para simulação de secagem de feijão macassar em camada espessa pelo modelo de Thompson e modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Equilíbrio higroscópico – isotermas de dessorção

O conteúdo de água de equilíbrio higroscópico dos grãos de feijão macassar foi determinado para as temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C, e encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Conteúdo de água de equilíbrio higroscópico do feijão macassar obtido por dessorção.

Umidade Relativa (decimal)	Temperatura (°C)			
	20	30	40	50
	Conteúdo de água de equilíbrio (% base seca)			
0,10	2,65	2,18	3,16	3,12
0,20	6,32	6,23	6,25	5,70
0,25	8,50	7,31	7,20	6,30
0,35	10,09	8,85	9,30	7,76
0,45	12,60	11,53	10,45	9,61
0,55	15,30	12,45	11,80	11,05
0,65	16,86	16,10	14,80	13,55
0,75	23,30	20,60	19,91	18,30
0,85	29,45	26,80	25,50	24,70

Fonte: Dados coletados por OLIVEIRA (2004)

Os dados experimentais das isotermas de dessorção do feijão macassar e os calculados pela Equação 47, encontram-se na Figura 8. Observa-se que o modelo utilizado ajusta-se aos dados experimentais com um coeficiente de determinação de 98,95 %.

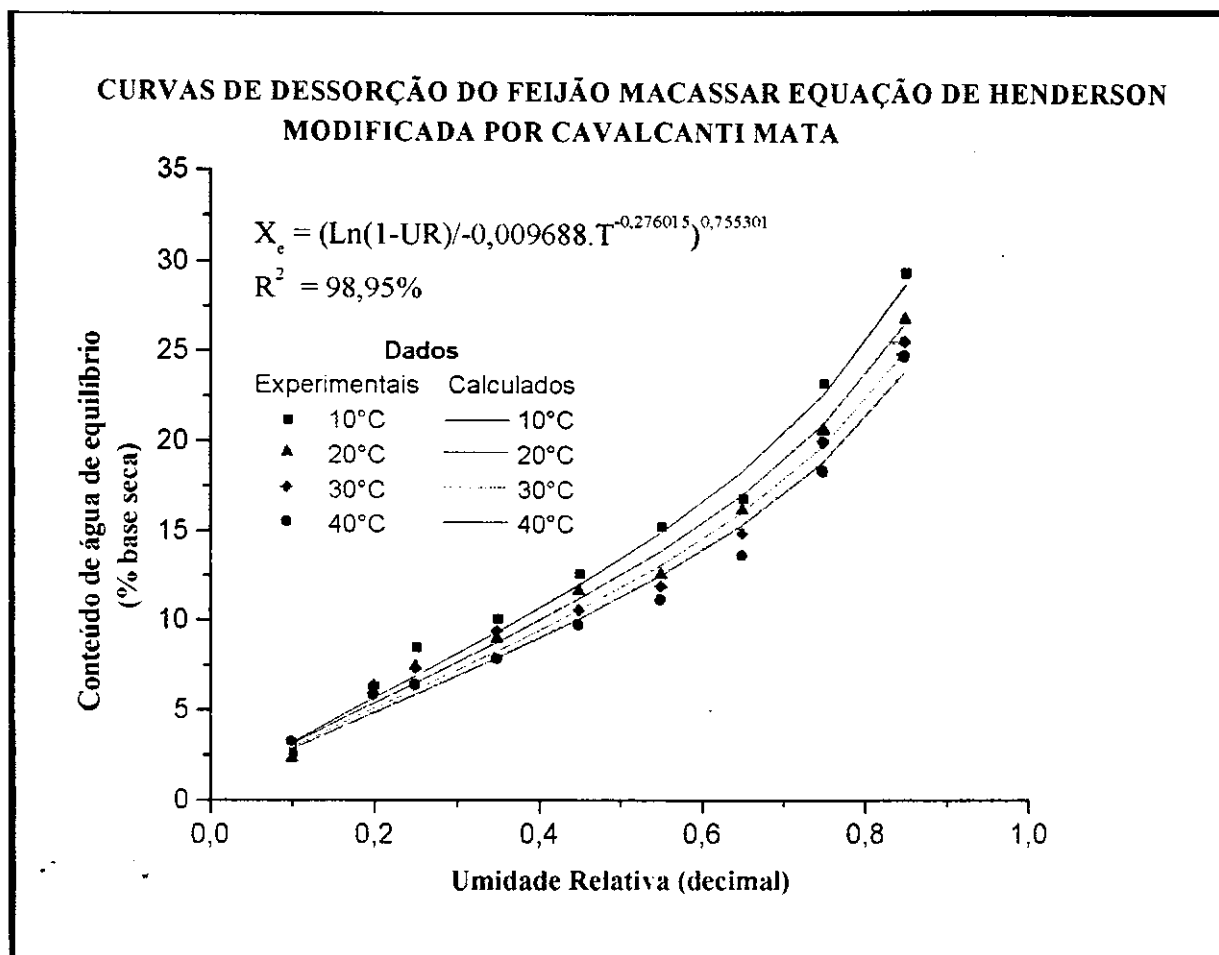


Figura 8 - Dados experimentais e calculados do conteúdo de água de equilíbrio higroscópico dos grãos de feijão macassar.

4.2. Calor latente de vaporização

Na Tabela 2 estão as umidades relativas de equilíbrio obtidas pela Equação 47, para o feijão macassar, e determinadas para os conteúdos de água do feijão de 5 a 25% base seca e temperaturas de 20 a 50 °C. Com os dados de umidade relativa de equilíbrio, determinou-se a pressão de vapor da umidade dos grãos de feijão macassar. A pressão de vapor (P_v) é obtida pela equação $P_v = UR \times P_{vs}$, em que P_{vs} é determinado pela Equação 49.

O logaritmo neperiano dos dados da Tabela 3, (P_v) foram determinados e estão na Tabela 4. Estes dados foram plotados com o logaritmo neperiano dos dados de pressão de vapor de saturação (P_{vs}), para determinação do coeficiente angular obtido por regressão linear, mostrado na Figura 8, conforme sugerido por (BROOKER *et al.*, 1992).

Tabela 2 – Umidades relativas de equilíbrio obtidas pela Equação 47, para isotermas de dessecção do feijão macassar em função dos conteúdos de água e temperaturas pré-estabelecidas.

X _e (% base seca)	Temperatura (°C)			
	20	30	40	50
	Umidade relativa de equilíbrio			
5	0,1467	0,1682	0,1851	0,1993
10	0,3497	0,3932	0,4261	0,4528
15	0,5377	0,5917	0,6305	0,6607
20	0,6889	0,7421	0,7783	0,8051
25	0,8001	0,8457	0,8747	0,8951

Tabela 3 – Pressão de vapor da água do feijão macassar correspondente às umidades relativas de equilíbrio obtidas através da Equação 47, para as isotermas de dessecção para, os conteúdos de água e temperaturas pré-estabelecidos.

X _e (% base seca)	Temperatura (°C)			
	20	30	40	50
	P _v (mm Hg)			
5	2,5740	5,3571	10,2514	18,4550
10	6,1362	12,5237	23,5971	41,9305
15	9,4343	18,8437	34,9143	61,1856
20	12,0860	23,6355	43,0990	74,5625
25	14,0374	26,9336	48,4374	82,8969
P _{vs}	17,5447	31,8477	55,3726	92,6071

Tabela 4 – Logaritmo neperiano da pressão de vapor da água do feijão macassar correspondente às umidades relativas de equilíbrio obtidas através da Equação 47, para as isotermas de desorção para os conteúdos de água e temperaturas pré-estabelecidos.

X _e (% base seca)	Temperatura (°C)			
	20	30	40	50
	Ln (P _v) (mm Hg)			
5	0,9455	1,6784	2,3274	2,9153
10	1,8142	2,5276	3,1611	3,7360
15	2,2443	2,9362	3,5529	4,1139
20	2,4921	3,1627	3,7635	4,3116
25	2,6417	3,2934	3,8803	4,4176
Ln (P _{vs})	2,8648	3,4610	4,0141	4,5284

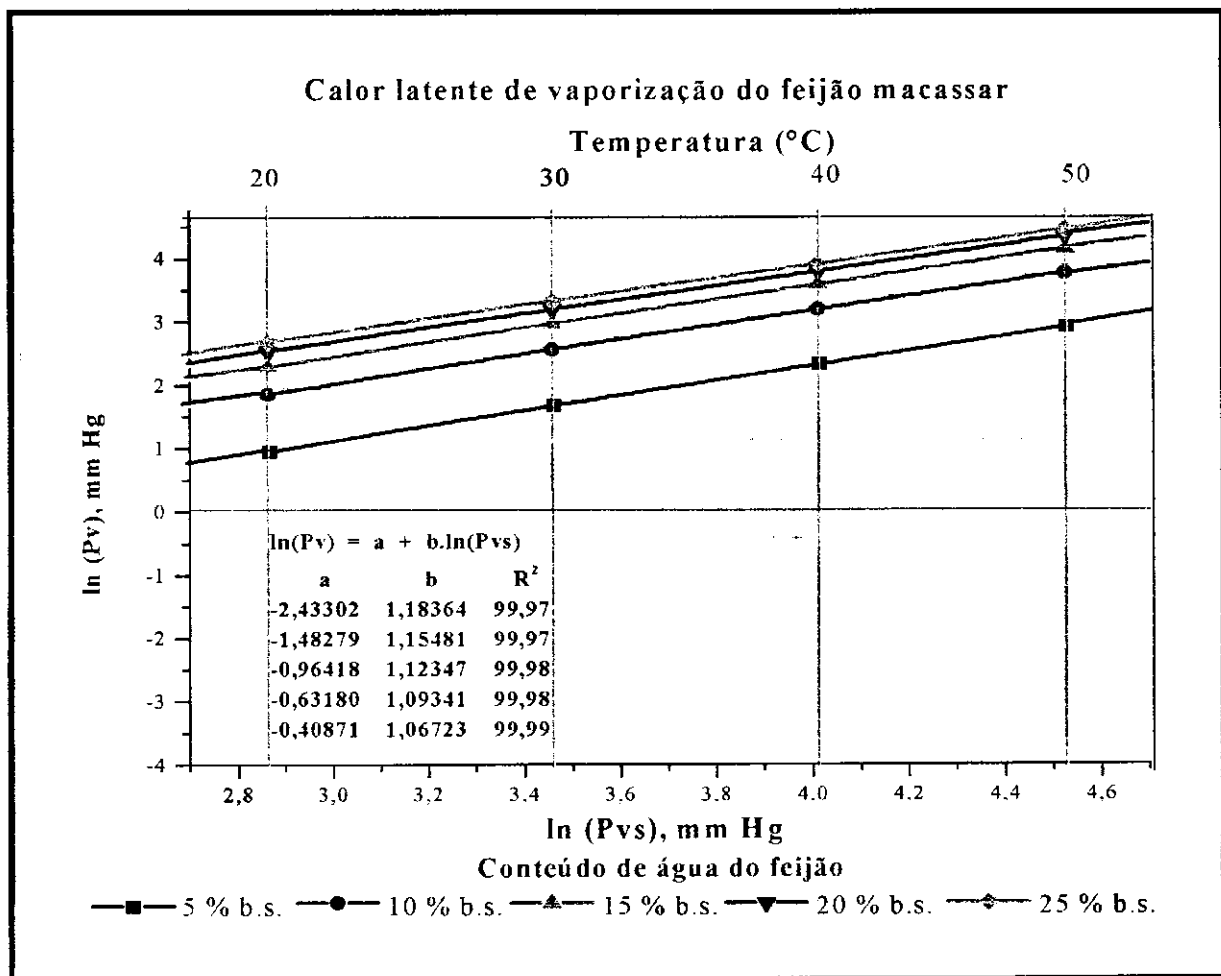


Figura 9 - Retas de "Othmer" para determinação do calor latente de vaporização do feijão macassar.

Na Tabela 5 estão os valores do calor latente de vaporização da água do feijão macassar decorrente das Tabelas 2, 3 e 4.

O calor necessário para evaporar a água do feijão aumenta com a diminuição do seu conteúdo de água e da temperatura. Observa-se na Tabela 5 que quando o feijão está com um conteúdo de água de 25% base seca, o valor do calor latente de vaporização se aproxima do calor latente de vaporização da água livre. Este fato foi observado por vários autores entre os quais CAVALCANTI MATA, (1997).

Na Figura 10 está a equação do calor latente de vaporização do feijão macassar em função da temperatura e do seu conteúdo de água obtida por regressão não linear, em que se constata um coeficiente de correlação de 98,72 %. Nesta figura também é mostrada a representação gráfica dos dados observados com os dados calculados pela equação.

Tabela 5 – Calor latente de vaporização dos grãos de feijão macassar em função da temperatura e do conteúdo de água de equilíbrio pré-estabelecidos.

Determinação do calor latente de vaporização (h_{fg}') em função da temperatura e do conteúdo de água de equilíbrio					
X_e (% b.s.)	Temperatura °C				(inclinação)
	20	30	40	50	
	h_{fg}' (kcal\timeskg$^{-1}$$\times$°C$^{-1}$) = h_{fg} x inclinação da reta (inclinação)				
5	703,7923	697,0456	690,2988	683,5521	1,18364
10	686,6500	680,0676	673,4852	666,9028	1,15481
15	667,4207	661,0226	654,6245	648,2264	1,12247
20	650,1416	643,9091	637,6767	631,4443	1,09341
25	634,5750	628,4917	622,4085	616,3253	1,06723
h_{fg}	594,6000	588,9000	583,2000	577,5000	

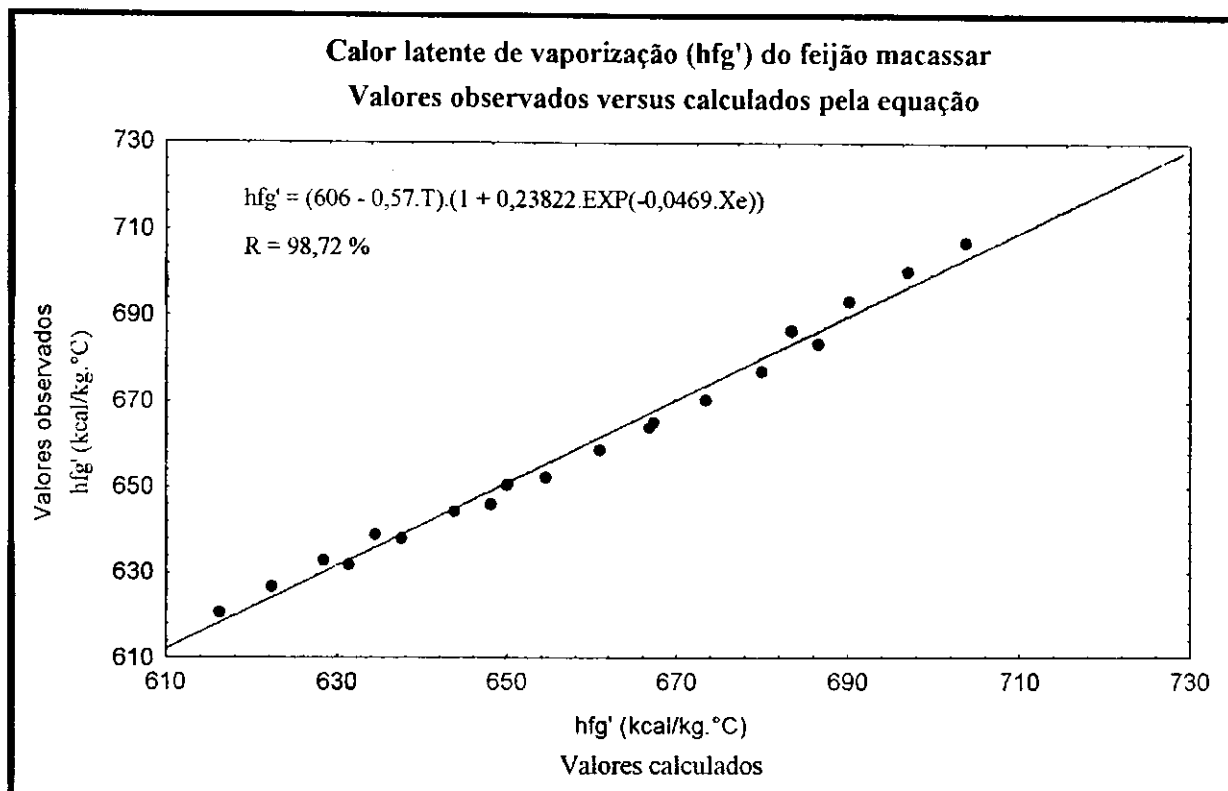


Figura 10 - Equação do calor latente de vaporização do feijão macassar obtida por regressão não linear – Valores observados x Valores calculados

4.3. Calor específico

Na Tabela 6 estão as variações do calor específico do feijão macassar em função do conteúdo de água. Observa-se que o calor específico do feijão macassar cresce linearmente com o aumento do seu conteúdo de água. Diversos autores entre os quais Ducan *et al.* e Moysey *et al.*, citados por CAVALCANTI MATA (1997) observaram este mesmo comportamento para diversos tipos de grãos.

Tabela 6 – Calor específico do feijão macassar em função do seu conteúdo de água.

Conteúdo de água (% base seca)	Calor específico	
	kcal×kg ⁻¹ ×°C ⁻¹	J×kg ⁻¹ ×°C ⁻¹
186	0,6882	2880,81
122	0,5742	2403,60
82	0,5045	2111,84
54	0,4590	1921,37
33	0,4178	1748,91
18	0,3863	1617,05
5	0,3643	1524,96

Na Figura 11 são plotados os dados experimentais do calor específico do feijão macassar, obtidos por análise de regressão linear, observa-se um coeficiente de determinação e 99,93%.

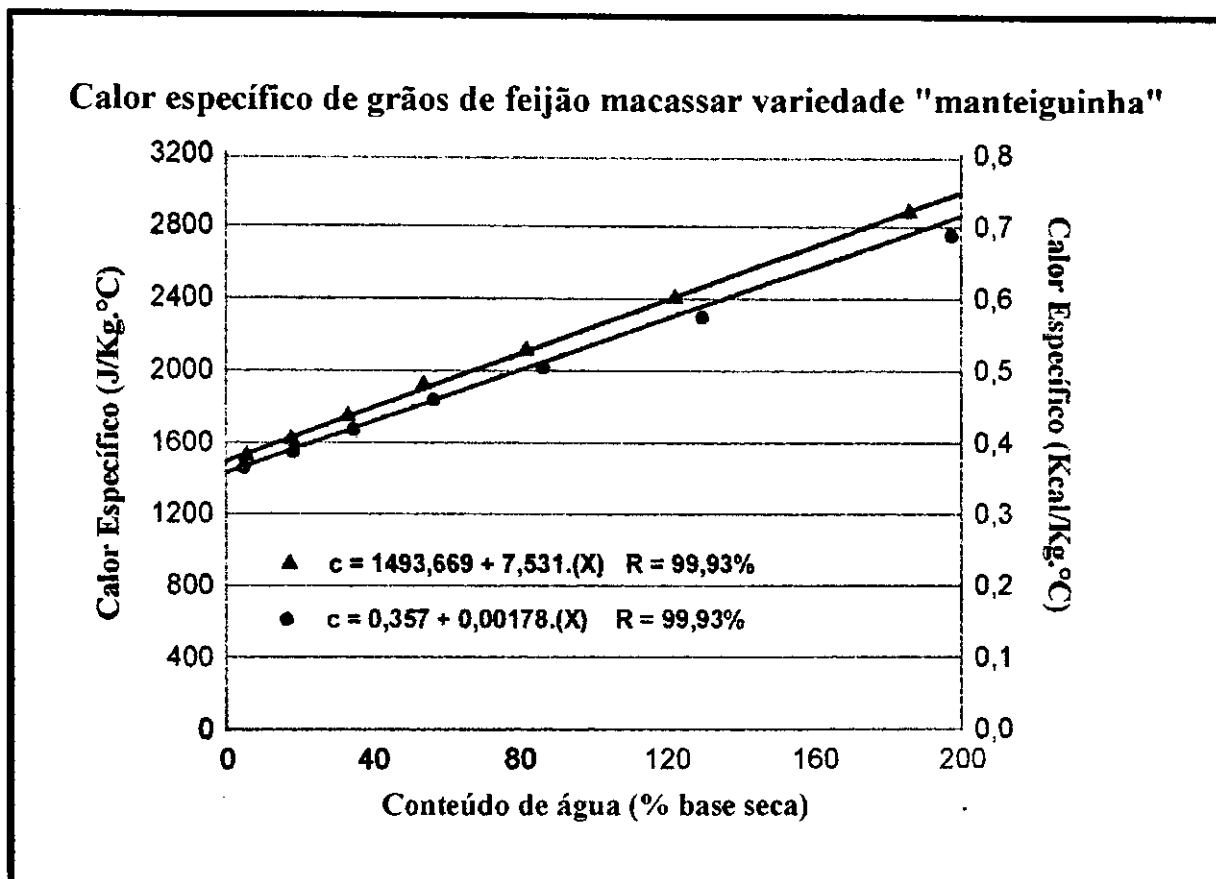


Figura 11 – Curva do calor específico do feijão macassar em função do seu conteúdo de água.

4.4. Curvas de secagem em camada fina

Nas Tabelas 7 e 8 encontram-se os coeficientes das equações de Page e Thompson, respectivamente, para cada temperatura e conteúdo de água inicial estudados, obtidos por regressão não linear. Observa-se que os coeficientes de determinação da equação de Page são relativamente melhor do que os coeficientes de determinação da equação de Thompson. No entanto, é possível dizer que estas duas equações se equivalem já que essas diferenças são pequenas.

Nas Figuras 12 a 14 e 15 a 17 encontram-se os dados experimentais e calculados pelas as equações de Page e Thompson para conteúdos de água inicial de 33, 82 e 182% em base seca, respectivamente. As curvas dos dados calculados estão representadas graficamente a partir dos valores dos coeficientes de “k” e “n” da equação de Page e “A” e “B” da equação de Thompson, obtidos por meio de regressão não linear em função da temperatura de secagem

e do conteúdo de água inicial dos grãos de feijão, sendo que as superfícies de resposta para os respectivos coeficientes estão nas Figuras 18 a 21.

Tabela 7 – Coeficientes da equação de **Page**, obtidos para cada temperatura e conteúdo de água inicial estudado.

Temperatura °C	Conteúdo de água inicial % (base seca)	k (min ⁻¹)	n	R ²
30	182	-0,003555	1,000030	97,77
40		-0,006659	0,983470	98,98
60		-0,013690	1,015015	99,82
30	82	-0,001269	1,143772	99,85
40		-0,034919	0,670435	99,61
60		-0,050001	0,751177	99,96
30	33	-0,000331	1,342263	98,71
40		-0,006010	0,955930	97,79
60		-0,014918	0,895234	98,22

Tabela 8 - Coeficientes da equação de **Thompson**, obtidos para cada temperatura e conteúdo de água inicial estudado.

Temperatura °C	Conteúdo de água inicial % (base seca)	A	B	R ²
30	182	358,513360	1,336166	96,74
40		210,287909	1,680442	98,91
60		57,1320333	5,599849	99,05
30	82	370,153330	-30,58042	99,69
40		220,365049	-11,99582	96,73
60		75,7219569	-2,956904	98,71
30	33	317,291684	-24,46009	97,38
40		232,386811	-18,86378	99,39
60		120,761656	-9,248275	97,98

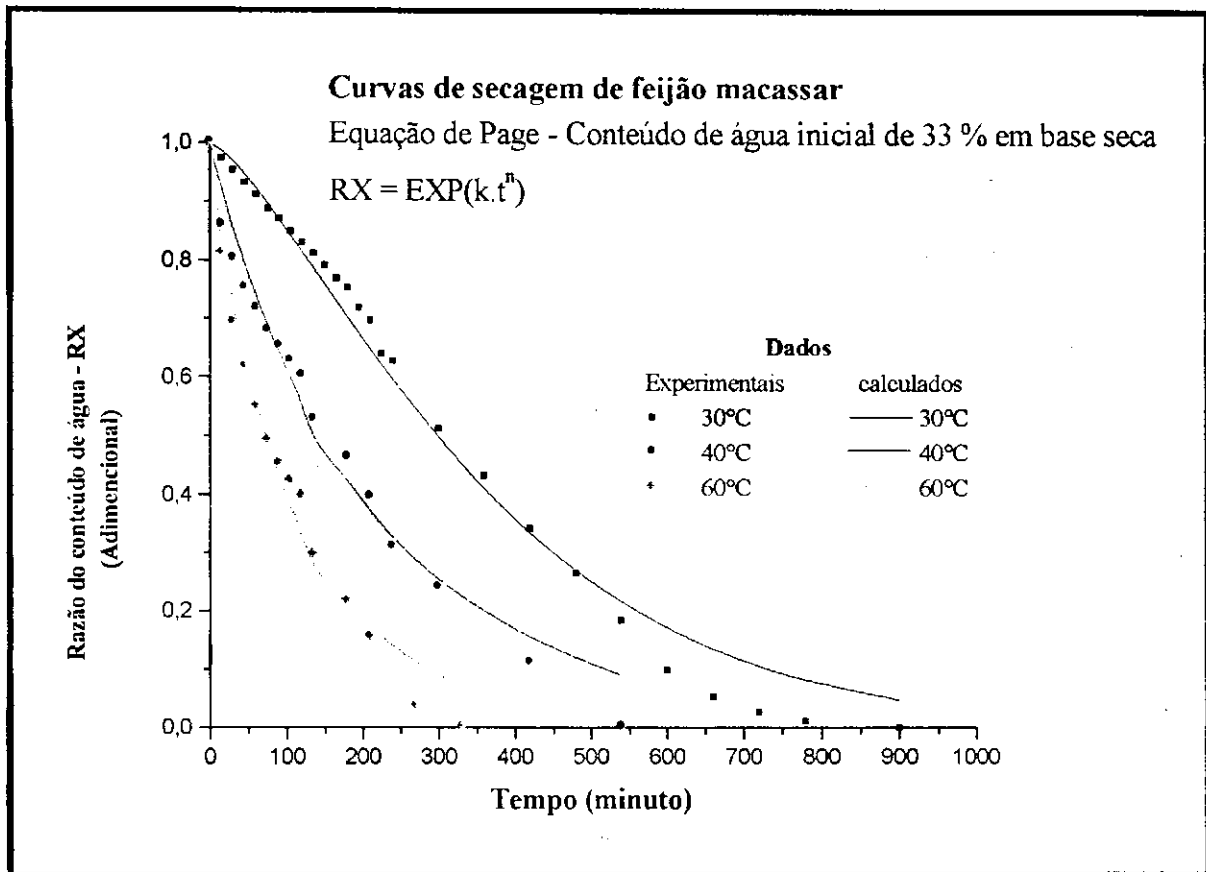


Figura 12 – Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão macassar e calculadas pela equação de Page, para um conteúdo de água inicial de 33% b. s.

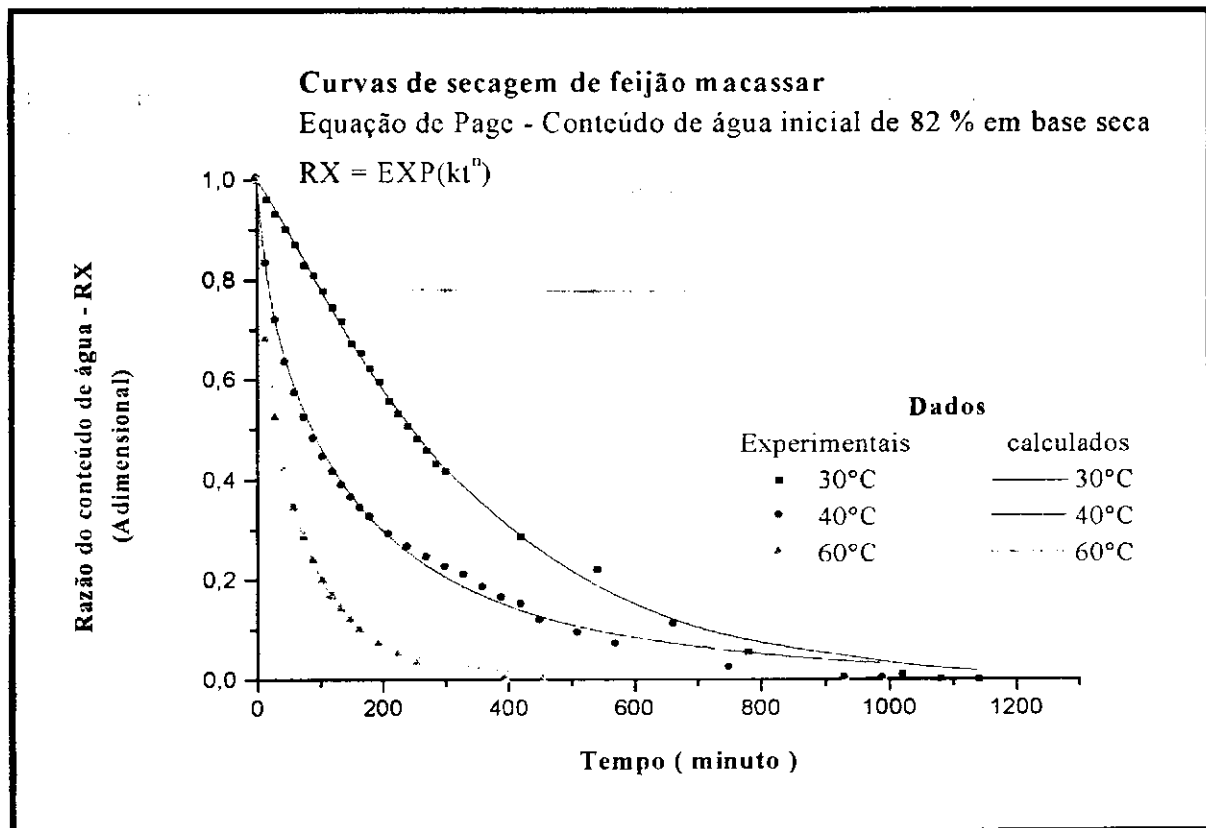


Figura 13 – Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão macassar e calculadas pela equação de Page, para um conteúdo de água inicial de 82% b.s.

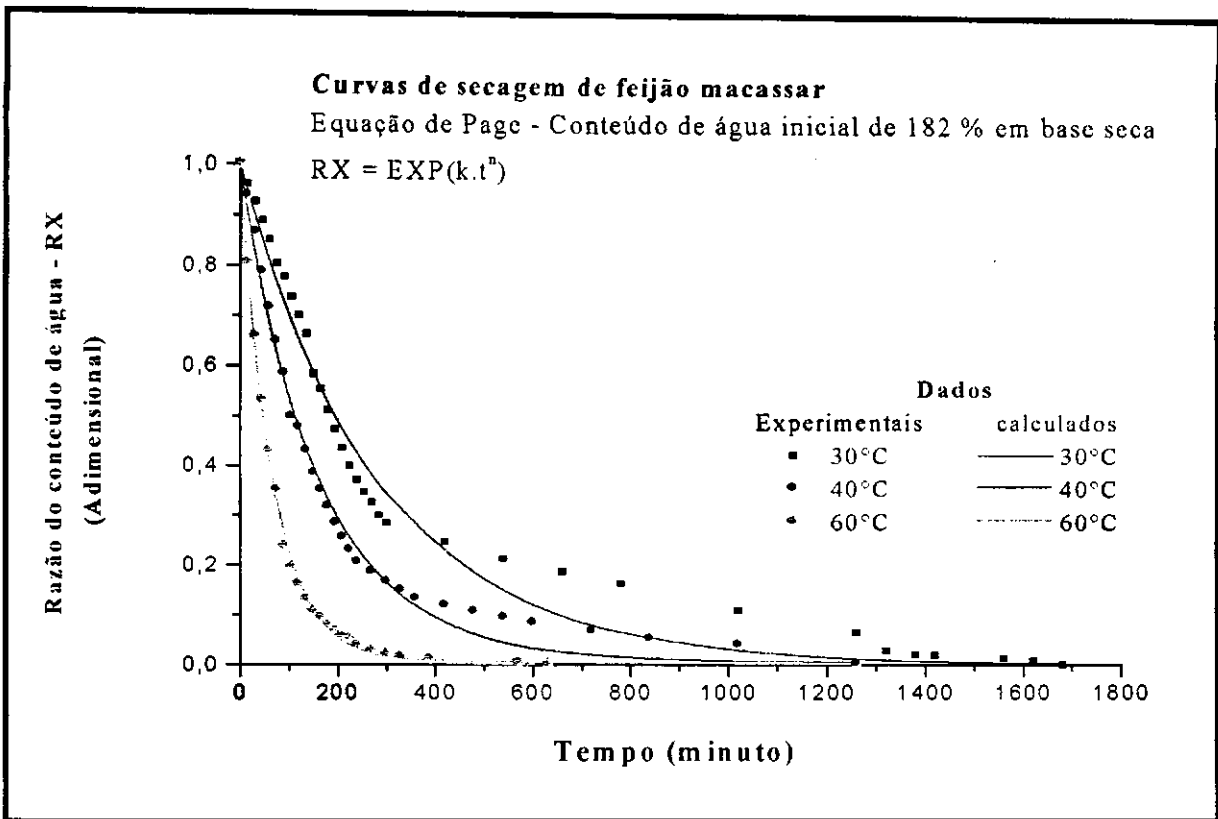


Figura 14 – Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão macassar e calculadas pela equação de Page, para um conteúdo de água inicial de 182% b.s.

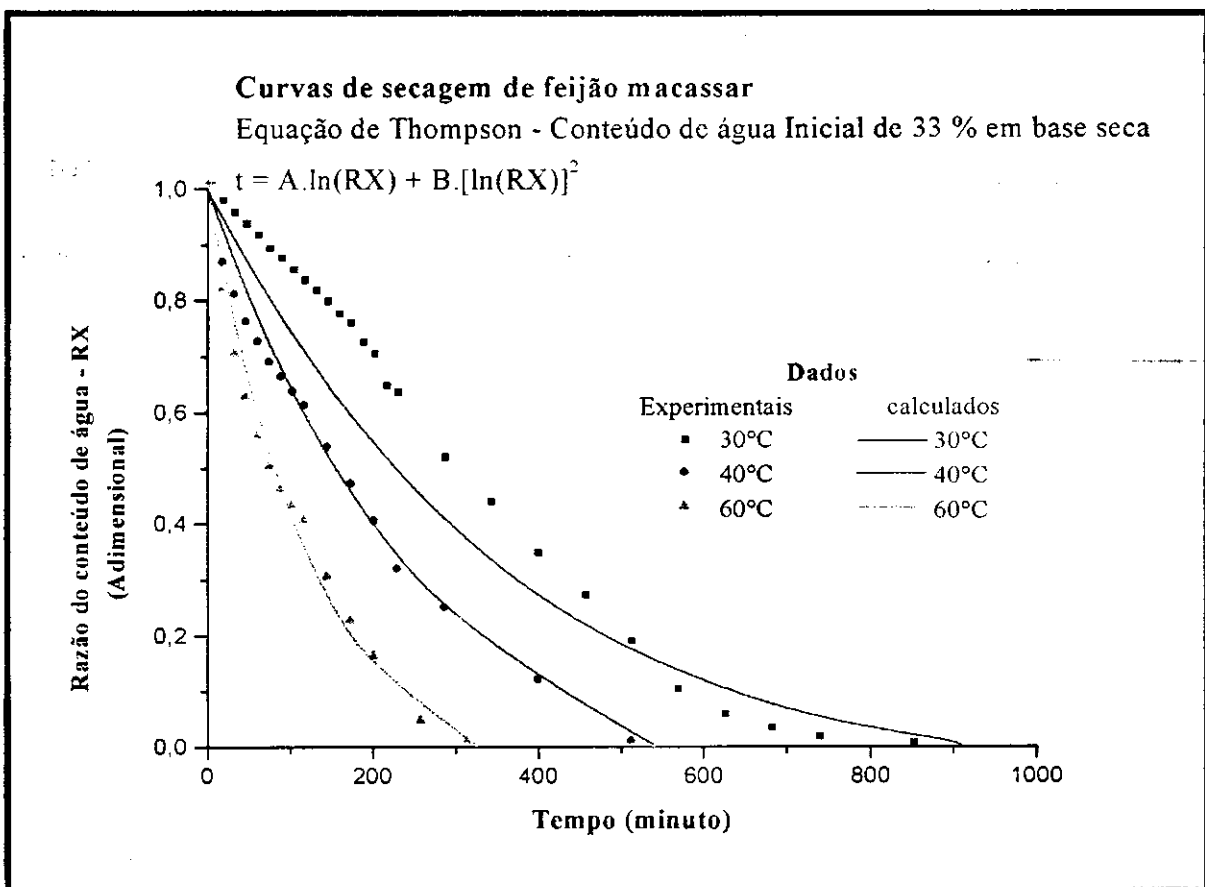


Figura 15 – Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão macassar e calculadas pela equação de Thompson, para um conteúdo de água inicial de 33% b.s.

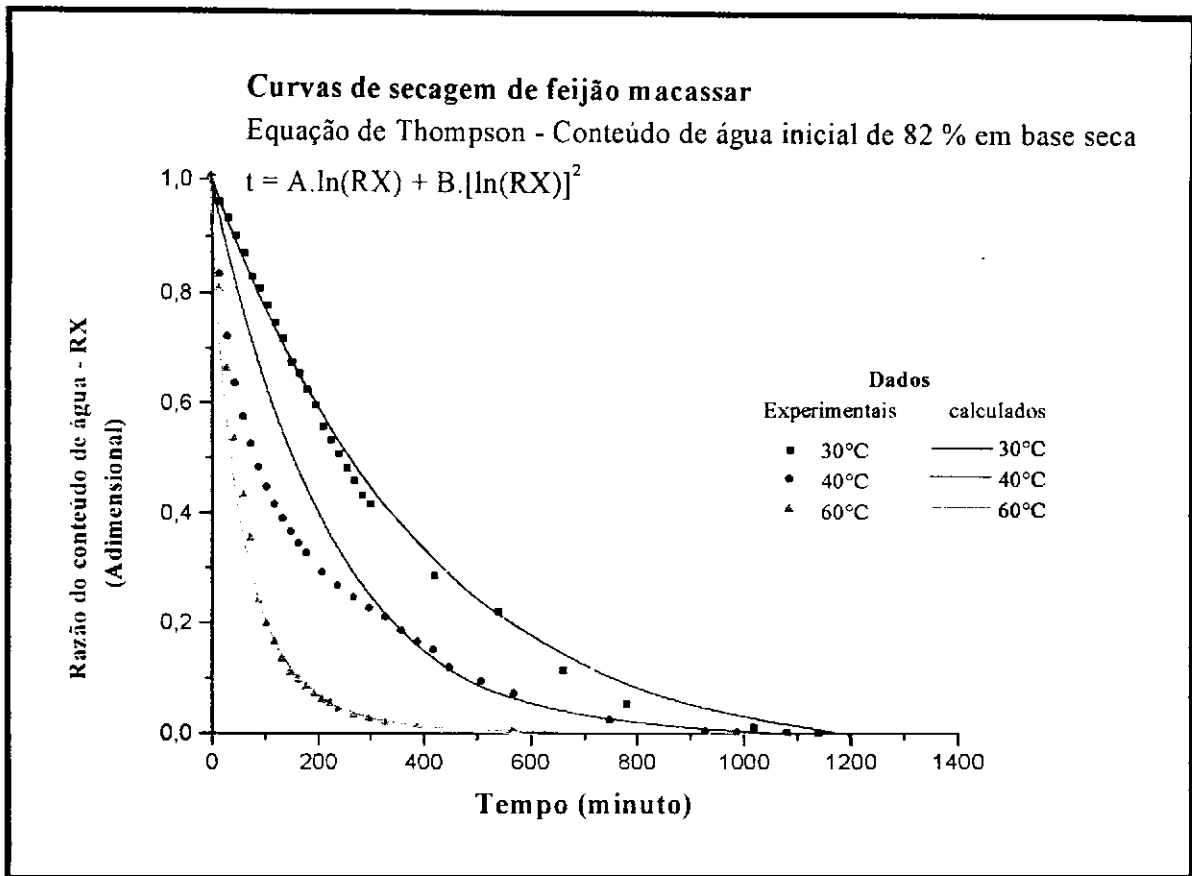


Figura 16 – Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão macassar e calculadas pela equação de Thompson, para um conteúdo de água inicial de 82% b.s.

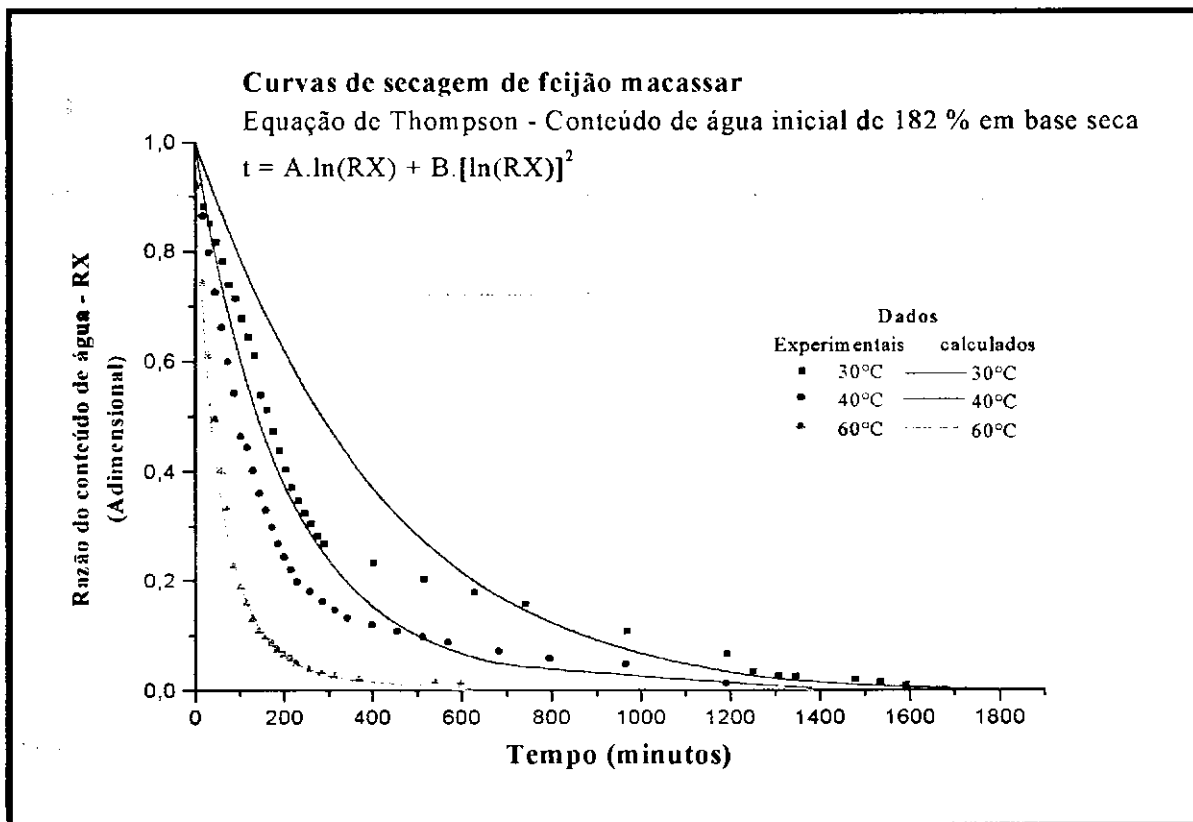


Figura 17 – Curvas dos dados experimentais dos grãos de feijão macassar e calculadas pela equação de Thompson, para um conteúdo de água inicial de 182% b.s.

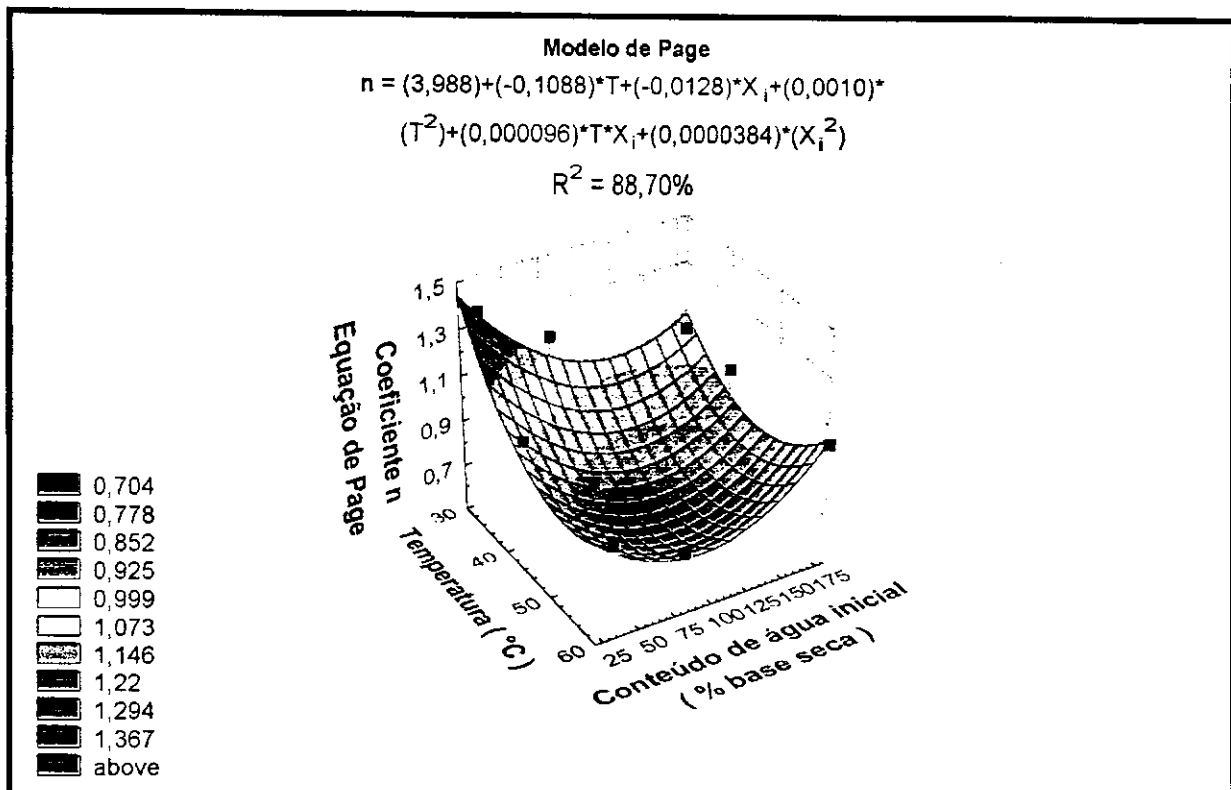


Figura 18 – Superfície de resposta do coeficiente “n” da equação de Page em função do conteúdo de água inicial e da temperatura de secagem, obtida por regressão não linear.

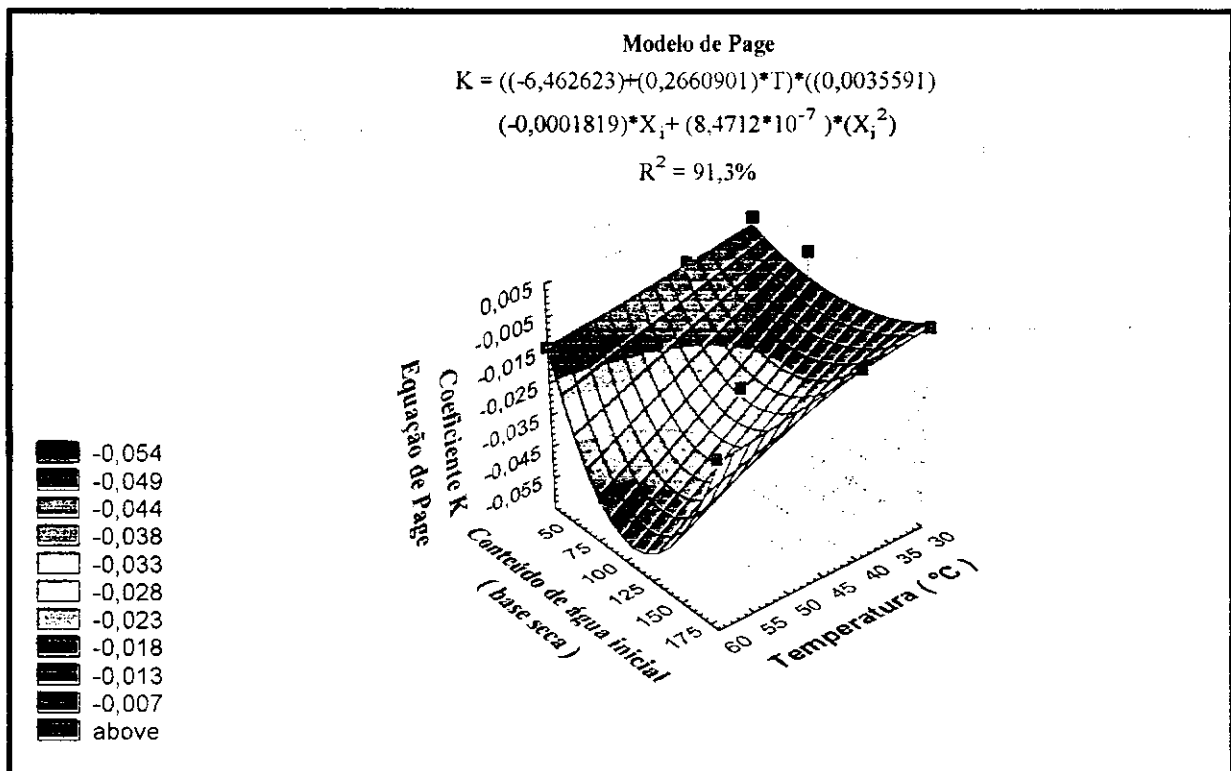


Figura 19 – Superfície de resposta do coeficiente “k” da equação de Page em função do conteúdo de água inicial e da temperatura de secagem, obtida por regressão não linear.

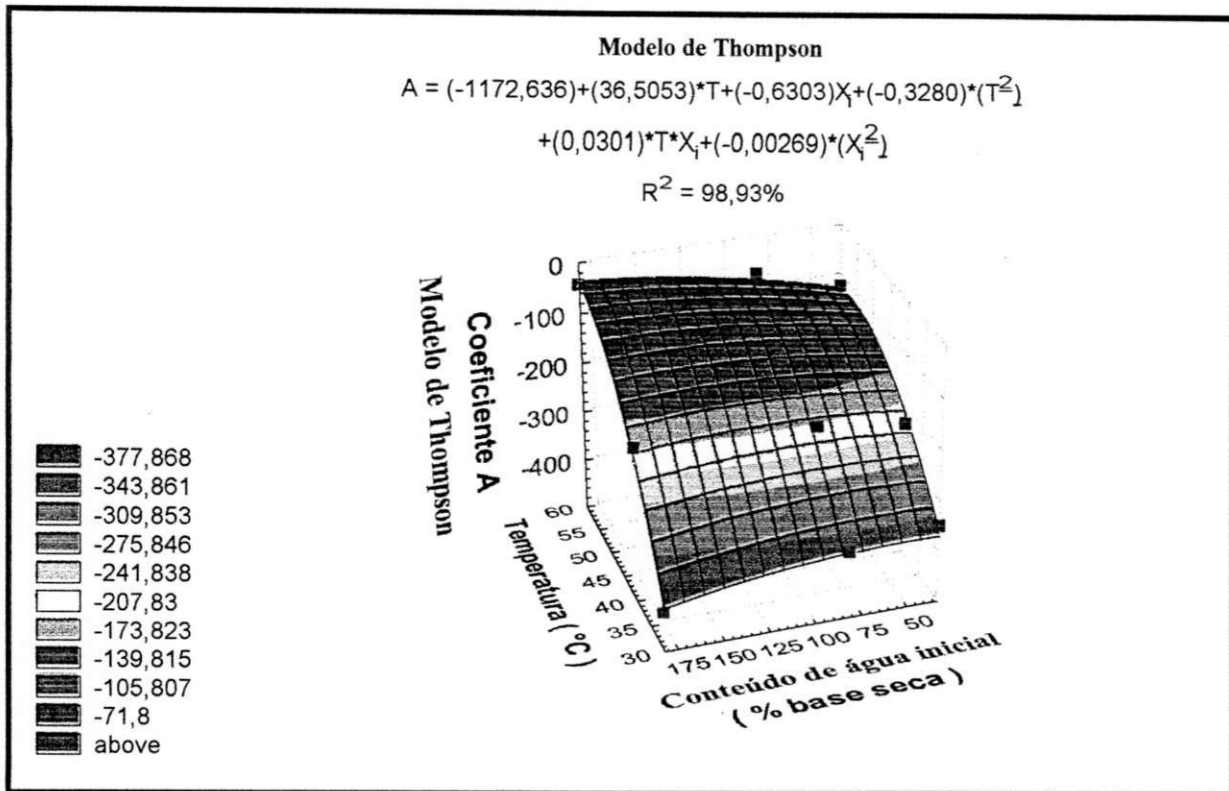


Figura 20 – Superfície de resposta do coeficiente “A” da equação de **Thompson** em função do conteúdo de água inicial e da temperatura de secagem, obtida por regressão não linear.

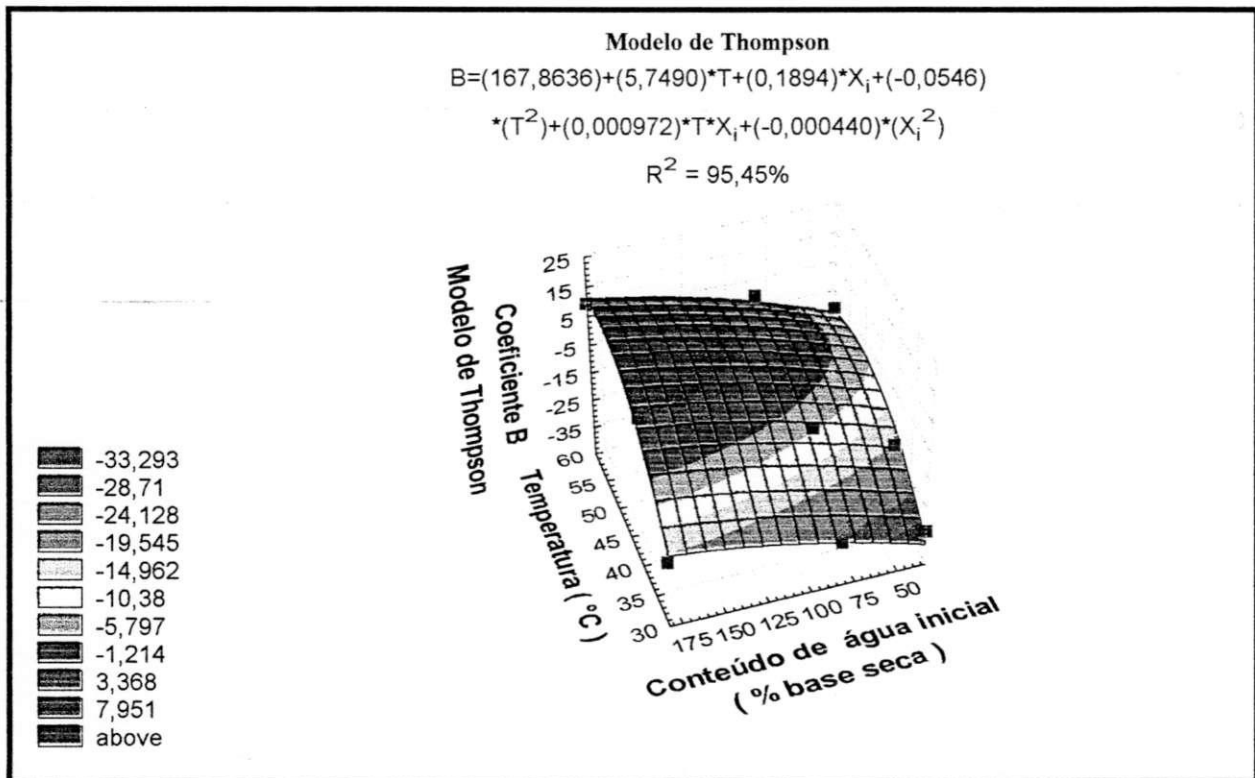


Figura 21 – Superfície de resposta do coeficiente “B” da equação de **Thompson** em função do conteúdo de água inicial e da temperatura de secagem, obtida por regressão não linear.

4.5. Simulação de secagem em camada espessa

Os dados experimentais e os simulados pelo modelo de Thompson e pelo modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003) com as modificações das equações próprias para o feijão macassar variedade “manteiguinha” (conteúdo de água de equilíbrio, calor latente de vaporização, calor específico, curvas de secagem em camada fina e contração volumétrica da camada espessa) abaixo descrita, são apresentados nas Figuras 22 a 31, para temperaturas de 52 e 28 °C e conteúdos de água inicial de 223 e 193 % base seca, respectivamente.

i) Modelo de Thompson

$$a) X_e = (\ln(1-UR) / -0,009688 \times T^{0,276015})^{0,75530}$$

$$b) h'_{fg} = (606 - 0,57 \times T) \times (1 + 0,23822 \times \exp(-0,0469 \times X_e))$$

$$c) c_p = 0,357 + 0,00178 \times (X_{bu}),$$

$$d) t = A \times \ln(RX) + B \times [\ln(RX)]^2$$

$$A = -14,8525 + 0,412 \times T - 0,0147 \times X_i + 0,000317 \times T \times X_i - 0,0033 \times T^2 + 0,00001183 \times X_i^2$$

$$B = 1,3326 + 0,03583 \times T + 0,0013 \times X_i - 0,00005 \times T \times X_i - 0,00025 \times T^2 + 0,000015 \times X_i^2$$

ii) Modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003)

$$e) C_v = h_i - \left(\left(\left(100 - \frac{X_{med}}{X_i} \times 100 \right) \div 1,49235 \right) \times h \right) \div 100$$

Observa-se nas Figuras 22 a 31 que os dados de secagem simulados, acompanham de modo geral, os dados experimentais para as duas temperaturas estudadas, verificando-se algumas defasagens entre as curvas experimentais e calculadas. No entanto, pode-se observar o aumento desta dispersão quando se utiliza o modelo de Thompson.

Verifica-se, pelas Figuras 22 a 29 que o tempo de secagem simulado pelo modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003) foi o que mais se aproximou do tempo de secagem experimental para as duas temperaturas estudadas.

Na Figura 23 verifica-se uma superestimação na 3^a e 4^a camada quando utilizamos o modelo de Thompson para temperatura de 52 °C e conteúdo de água inicial de 233% em base seca. Esta mesma superestimação torna-se a repetir na Figura 25 nas mesmas proporções para temperatura de 28 °C e conteúdo de água inicial de 193% em base seca.

As Figuras 26 a 29 encontram-se os perfis de temperatura nas duas condições de simulação em função do tempo, verificando-se que as curvas simuladas correspondem satisfatoriamente as experimentais e que a equação de balanço de calor é eficaz para representar o processo, principalmente quando existe um bom isolamento térmico do secador.

Os resultados confirmam as afirmações feitas por CAVALCANTI MATA (1993) e SILVA (1995) que relatam que o modelo de Thompson é satisfatório para prever a simulação de secagem de produtos agrícolas e atribuem o sucesso do modelo à utilização de equações próprias de cada produto, e dentro do intervalo especificado, e das condições de secagem nas quais essas equações foram desenvolvidas. No entanto, quando se considera a contração volumétrica da camada espessa, o resultado simulado pelo modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003) apresenta uma menor dispersão.

Observar nas Figuras 30 e 31 que os dados experimentais e simulados da contração volumétrica da camada, apresentam os mesmos comportamentos com desvios médios relativos de 3,354 e 8,414 % respectivamente, sendo este desvios considerado baixo.

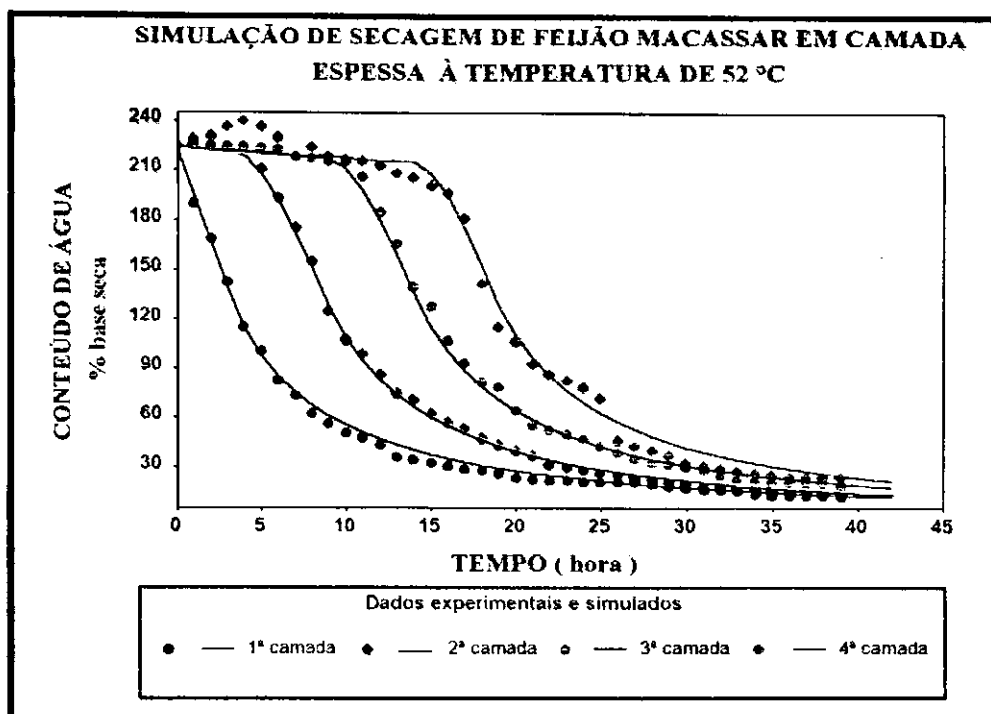


Figura 22 – Dados experimentais e simulados de secagem em camada espessa do feijão macassar para temperatura de 52 °C e conteúdo de água inicial de 223 % b.s. pelo modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003).

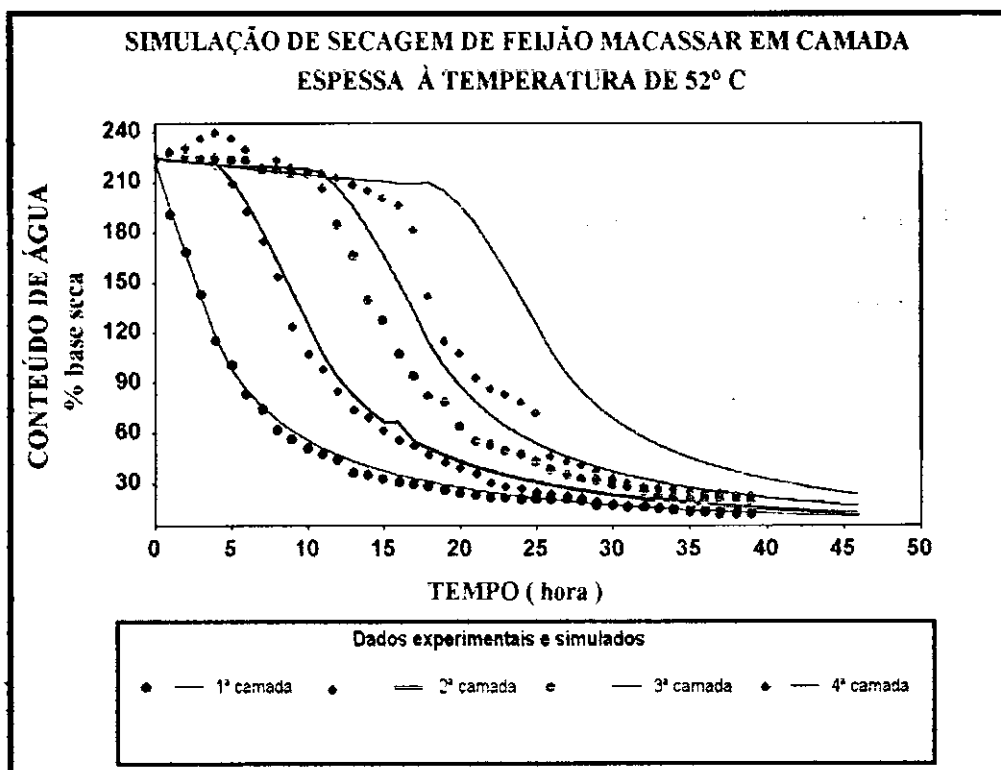


Figura 23 – Dados experimentais e simulados de secagem em camada espessa do feijão macassar para temperatura de 52 °C e conteúdo de água inicial de 223 % b.s. pelo modelo de Thompson.

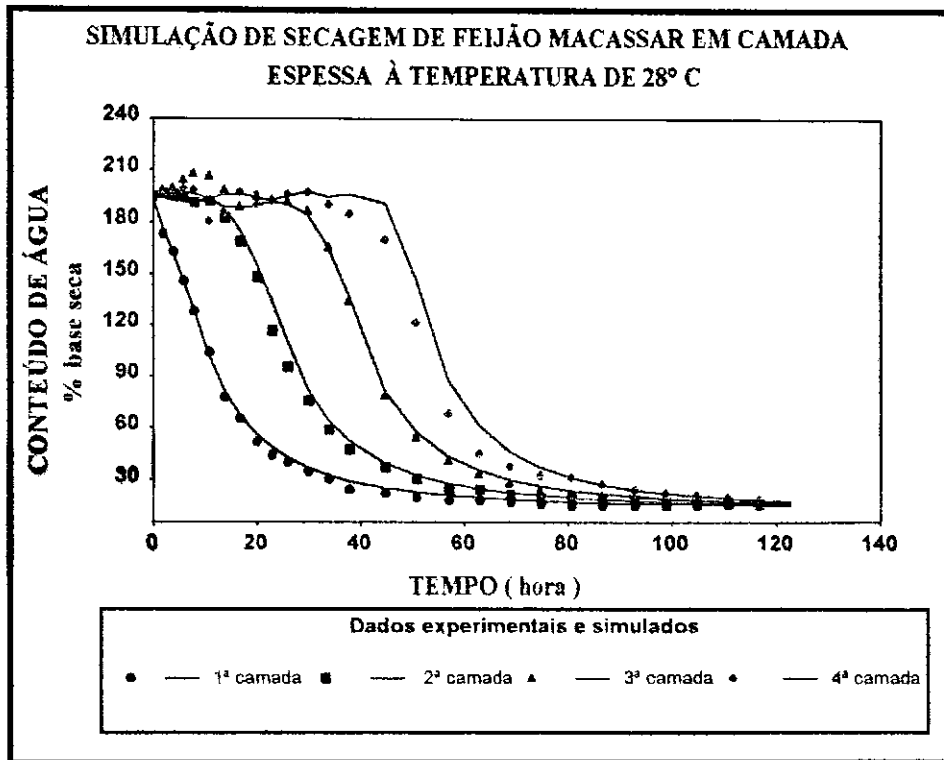


Figura 24 – Dados experimentais e simulados de secagem em camada espessa do feijão macassar para temperatura de 28 °C e conteúdo de água inicial de 193 % b.s. pelo modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003).

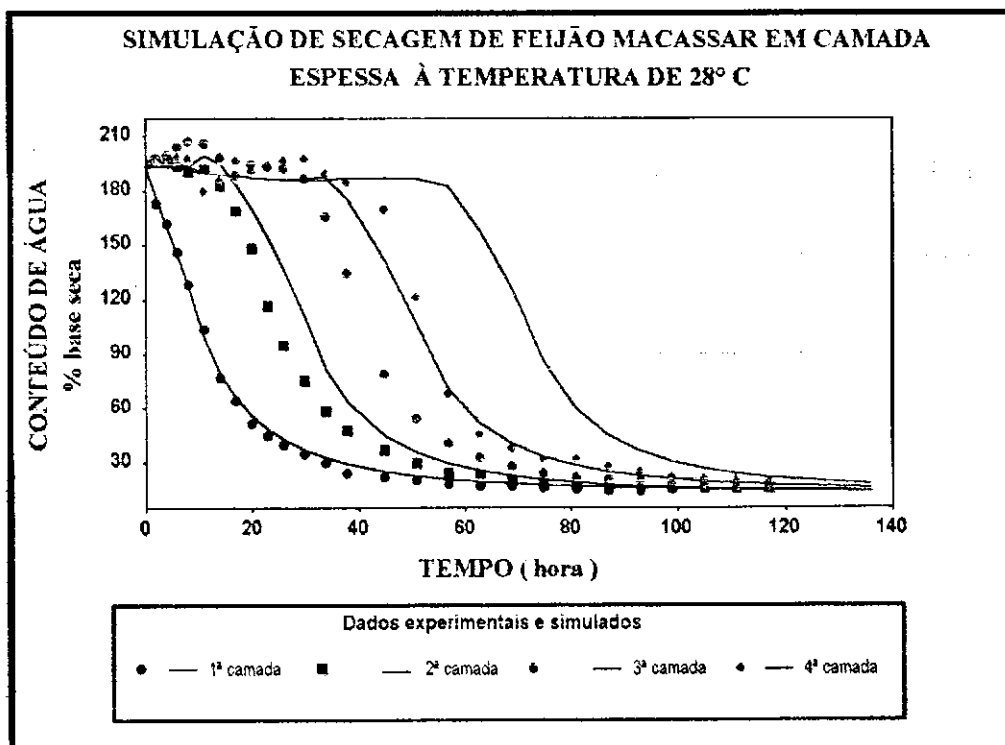


Figura 25 – Dados experimentais e simulados de secagem em camada espessa do feijão macassar para temperatura de 28 °C e conteúdo de água inicial de 193 % b.s. pelo modelo de Thompson.

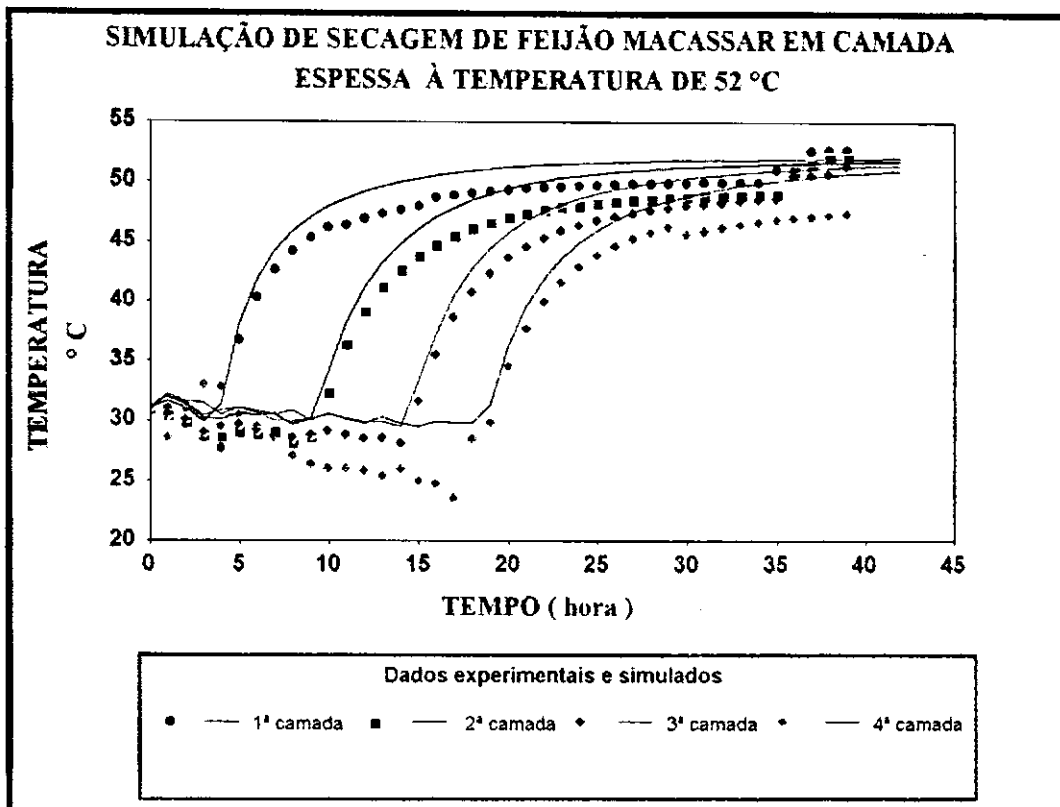


Figura 26 – Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa do feijão macassar para temperatura de 52 °C e conteúdo de água inicial de 233 % b.s. pelo modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003).

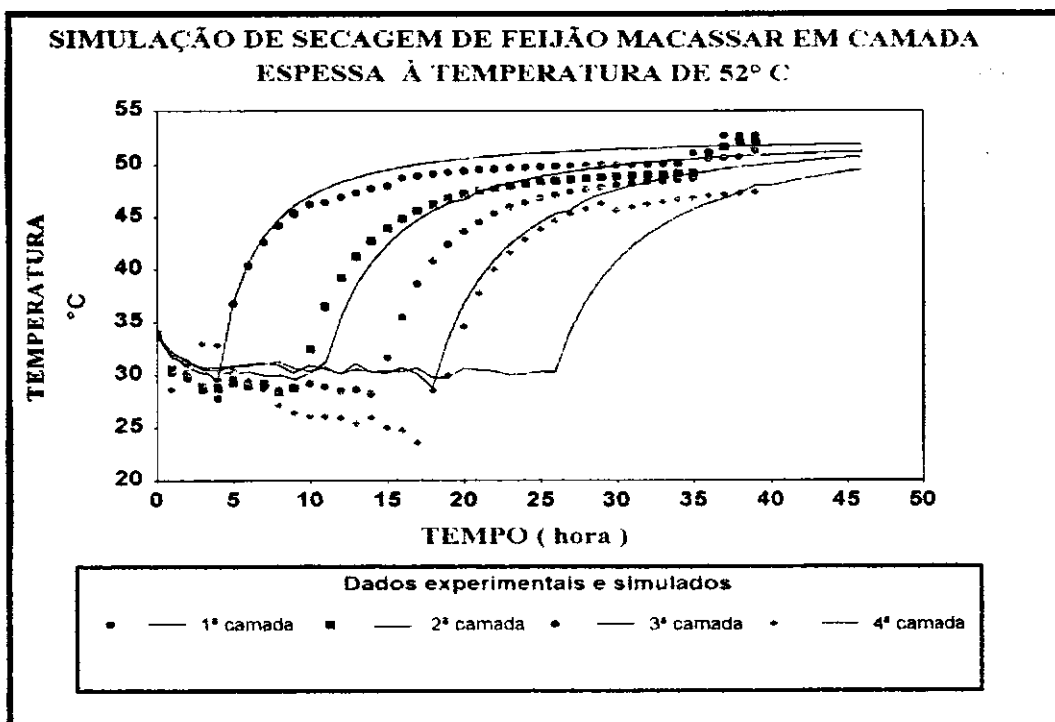


Figura 27 – Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa do feijão macassar para temperatura de 52 °C e conteúdo de água inicial de 233 % b.s. pelo modelo de Thompson.

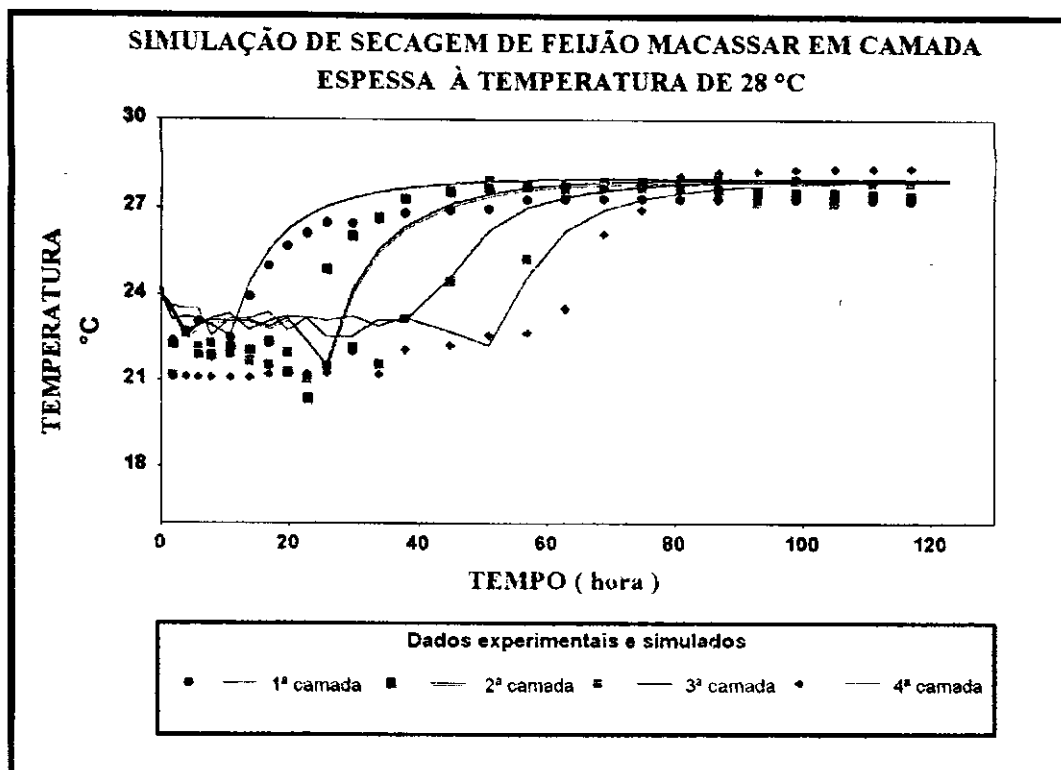


Figura 28 – Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa do feijão macassar para temperatura de 28 °C e conteúdo de água inicial de 193 % b.s. pelo modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003).

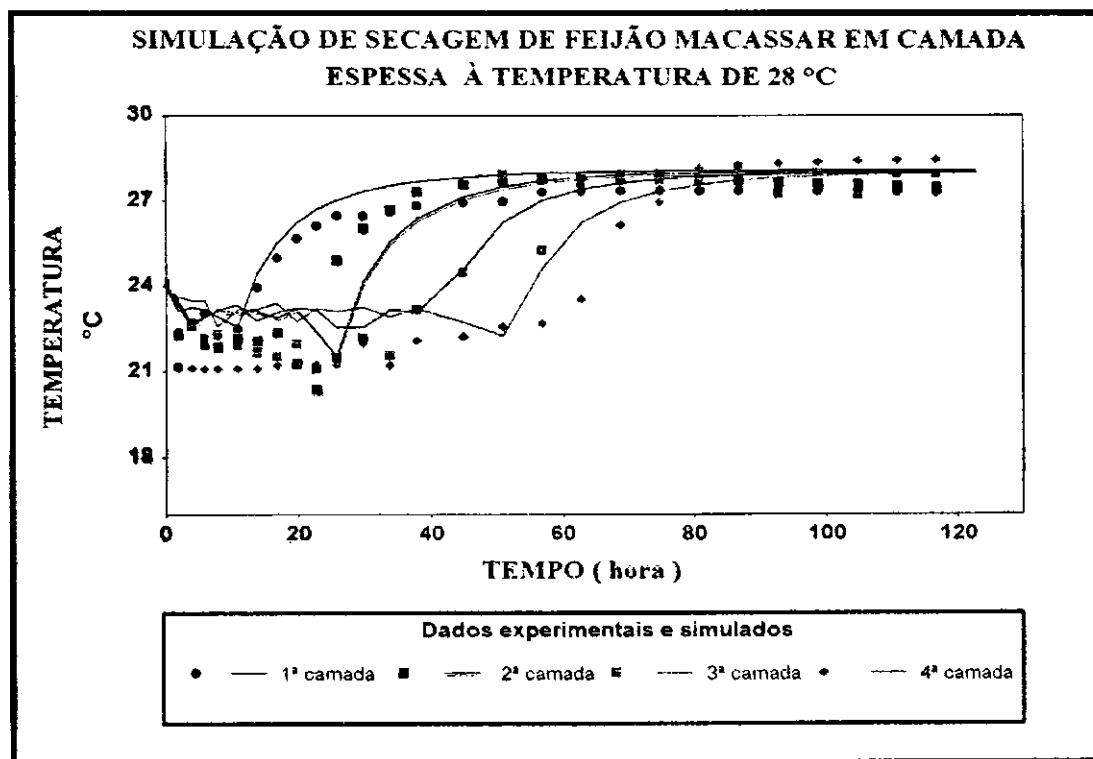


Figura 29 – Dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem em camada espessa do feijão macassar para temperatura de 28 °C e conteúdo de água inicial de 193 % b.s pelo modelo de Thompson.

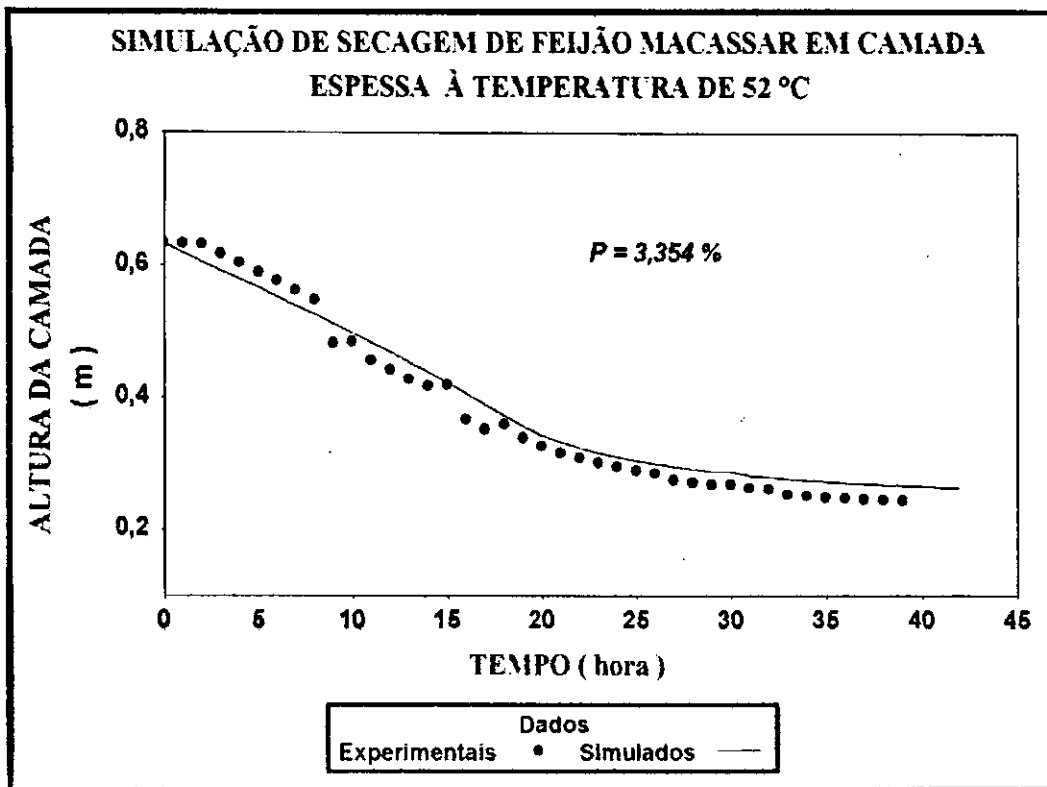


Figura 30 – Dados experimentais e simulados de contração volumétrica da camada durante a secagem em camada espessa do feijão macassar para temperatura de 52 °C e conteúdo de água inicial de 233 % b.s

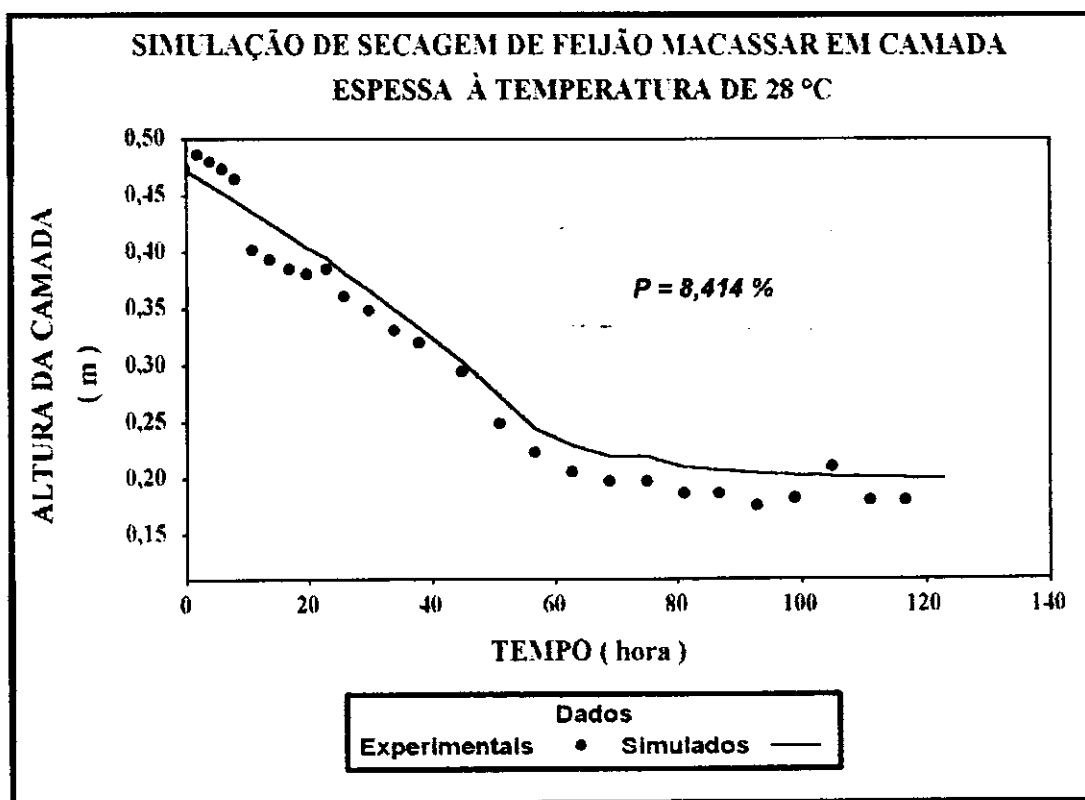


Figura 31 – Dados experimentais e simulados de contração volumétrica altura da camada durante a secagem em camada espessa do feijão macassar para temperatura de 28 °C e conteúdo de água inicial de 193 % b.s

Nas Tabelas 9 a 12 encontram-se os desvios médios relativos para os dois modelos utilizados no processo de simulação de secagem de feijão macassar variedade “manteiguinha”.

Analisando-se, as Tabelas 9 e 10, pode-se, então observar que o processo de simulação pelo modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003), apresentou melhores desvios em relação ao processo de simulação pelo modelo de Thompson. Este fato indica que o modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003), com as equações próprias do feijão macassar variedade “manteiguinha” de dessecamento, calor latente de vaporização, calor específico, curvas de secagem para camada fina e contração volumétrica da camada é válido para esta condição de simulação.

Nas Tabelas 11 e 12, observa-se que, de forma geral, os desvios médios encontrados são baixos, confirmando que não há influência dos modelos no comportamento dos dados experimentais com os dados simulados dos perfis de temperatura.

Tabela 9 - Desvio médio relativo calculados em função dos dados experimentais e simulados para temperatura de 52 °C e conteúdo de água inicial de 233% b.s.

Camada	<i>P</i> (%) Desvio médio relativo	
	Modelos	
	proposto por CAVALCANTI MATA (2003)	Thompson
1 ^a	8,065	8,332
2 ^a	6,149	12,264
3 ^a	4,139	22,554
4 ^a	10,80313	54,022

Tabela 10 - Desvio médio relativo calculados em função dos dados experimentais e simulados para temperatura de 28 °C e conteúdo de água inicial de 193% b.s.

Camada	<i>P</i> (%) Desvio médio relativo	
	Modelos	
	proposto por CAVALCANTI MATA (2003)	Thompson
1 ^a	9,3255	9,4211
2 ^a	5,705	15,130
3 ^a	3,367	23,250
4 ^a	7,462	50,680

Tabela 11 - Desvio médio relativo calculados em função dos dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem para temperatura de 52 °C e conteúdo de água inicial de 233% b.s.

Camada	<i>P</i> (%) Desvio médio relativo	
	Modelos	
	proposto por CAVALCANTI MATA (2003)	Thompson
1 ^a	3,821	2,603
2 ^a	4,388	3,196
3 ^a	4,388	6,527
4 ^a	8,839	13,299

Tabela 12 - Desvio médio relativo calculados em função dos dados experimentais e simulados dos perfis de temperatura do ar durante a secagem para temperatura de 28 °C e conteúdo de água inicial de 193% b.s.

Camada	<i>P</i> (%) Desvio médio relativo	
	Modelos	
	proposto por CAVALCANTI MATA (2003)	Thompson
1 ^a	2,629	2,188
2 ^a	3,541	4,577
3 ^a	3,650	5,155
4 ^a	6,770	7,424

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos para as condições em que foram realizados os experimentos, pode-se concluir que:

- Para uma mesma umidade relativa, o conteúdo de água de equilíbrio aumenta com a diminuição de temperatura e pode ser expresso pela equação $X_e = (\ln(1-UR)/-0,009688 \times T^{0,276015})^{0,75530}$ com um coeficiente de determinação de 98,9%.
- O calor latente de vaporização cresce com a diminuição do conteúdo de água do produto de 25 para 5% base seca e com diminuição da temperatura de 50 para 20 °C e pode ser representado pela equação $h'_{fg} = (606-0,57 \times T) \times (1+0,23822 \times \exp(-0,0469 \times X_e))$ com um coeficiente de correlação de 98,7%.
- O calor específico do feijão macassar varia linearmente com o seu conteúdo de água, obtendo-se a seguinte equação $c_p = 0,357 + 0,00178 \times (X_{bu})$, com um coeficiente de determinação de 99,9%.
- A equação proposta por Page para secagem em camada fina é a que melhor representa os dados experimentais com coeficiente de determinação variando de 97,8 a 99,9 %, quando comparada com a equação de Thompson com coeficiente de determinação variando de 96,7 a 99,7 %.
- Tanto os dados do conteúdo de água do feijão macassar, quanto os dados dos perfis de temperatura simulados pelo SoFeiMa, quando se considera a contração volumétrica da camada tem um desvio médio relativo menor que os dados simulados pelo modelo de Thompson.
- O tempo de secagem simulado pelo modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003) foi o que mais se aproximou do tempo de secagem experimental para as duas temperaturas estudadas.

- A compatibilidade entre os dados experimentais e os simulados comprovam a validade do modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003) para secagem de grãos de feijão macassar variedade “manteiguinha” em camada espessa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, B. V. **Determinação das propriedades físicas de amêndoa de cacau.** 1979. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1979.

BAKKER-ARKEMA, F.W.; LEREW, L.E.; DE BOER, S.F.; ROTH, M.G. **Grain dryer simulation.** Michigan: ARS-USDA, 1974, 80p. (Research Report no. 224).

BROOKER, D.B.; ARKEMA, F.W.B.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds.** New York: The AVI Van Nostrand Reinhold. 1992 450 p.

CASTELLAN, G.W. **Físico-Químico.** Livros Técnicos e Científicos. São Paulo: v. 1, p. 281, 302-312, 1976

CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; PINHEIROS FILHO, J.B.; FORTES, M. Estudo experimental de seca-aeração de amêndoas de cacau em camadas fina. **Revista Brasileira de Armazenamento.** Viçosa, MG, v. 5, n. 2, dez., 1980.

CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. ; ALMEIDA, F.A.C.; ARAGÃO, R.F.. Determinação do teor de umidade de equilíbrio dos grãos de feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L) Walp) variedade fígado de galinha, pelo método estático. **Revista Nordestina de Armazenagem,** Campina Grande, PB: a. 1, v. 2, p. 57-71, 1984.

CAVACALTI MATA, M. E. R. M. **Efeito da secagem em altas temperaturas por curtos períodos de tempo, em camada estacionária, sobre a armazenabilidade de grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) variedade “carioca”:** Avaliação experimental, modelagem e simulação. 1997. 328 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

CAVACALTI MATA, M. E. R. M. Simulação de secagem de milho branco BR-451 em secador de camada estacionária. **Revista Engenharia na Agricultura,** Viçosa. v. 6, n. 3, p 121–135. 1998.

CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. **Modelagem e simulação de secagem de feijão macassar considerando-se o encolhimento e os diferentes graus maturidade fisiológicas.** Projeto de pesquisa. Campina Grande, PB: Universidade Federal de Campina Grande. 60p, 2003.

CHAKRABARTI, S.M.; JOHNSON, W.H. Specific heat of flue cured tobacco by differential scanning colorimetry. **Transaction of the ASAE**, ST. Joseph, Michigan, v. 5, n. 15, p. 928-931, 1977.

FELLOWS, P. **Food processing technology: principles and practice.** Published jointly by Ellis Horwood Ltd., Chichester, England and VCA Verlagsgesellschaft GmbH, Weinheim, Federal Republic of Germany: 1988.

IOREZE, R. **Introdução a secagem de Produtos biológicos.** João Pessoa: Editora Universitária, 2004. 221p.

FREIRE FILHO, F. R.; CARDOSO, M. J.; ARAÚJO, A. G. Feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L) Walp) nomenclatura científica e nomes vulgares. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília: v. 18, n. 12, p 369-372. 1983.

GERMANO, M. L. L. R. **Emprego de produtos naturais no tratamento de grãos de feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L) Walp) acondicionadas em três embalagens e em microrregiões do Estado da Paraíba.** 1997. 77 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal da Paraíba, Areia, 1997.

HAWLADER, M. N. A.; UDDIN, M. S. HO. J. C.; TENG, A. B. W. Grying characteristics of tomatoes. **Journal Food Engineering**, v. 14, p. 259–268, 1991.

HERNANDEZ, J. A.; PAVON, G.; GARCIA, M. A. Analytical solution of mass transfer equation considering shrinkage for modeling food-drying kinetics. **Journal Food Engineering**, v. 45, p. 1–10, 2000

HUKILL, W.V. drying of grain, In: CHRISTENSEN, C.M. Ed. **Storage of cereal grains and their products.** 2ª ed. St. Paul: Minn. American Society of cereal Chemists, 1974, p. 481-508.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Rio de Janeiro: v. 13, n. 12, 2001.

KILPATRICK, P. W.; LOWE, E.; VAN ARSDEL, W. B. **Tunneldehydrators for fruit and vegetables**. In W. B. Van Arsdel Ed. *Advances in Food Research*, New York: Academic Press, v. 6, p. 313-372, 1955.

LASSERRAN, J.C. Princípios gerais de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**. Viçosa, MG: v. 3, n. 3, p. 17-46, 1978.

LOMAURO, C. J. ; BAKSHI, A. S.; LABZA, T. P. Moisture transfer propertier of dry and serminveste food. **Journal of Food Science**. v. 50, p. 397-400, 1985

MARTINS, J. H. **Simulação de secagem de milho em camada estacionária**. 1982. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1982.

MARTINS, J.H.; CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. **Introdução à teoria e simulação matemática de secagem de grãos**. Campina Grande, PB: Núcleo de Tecnologia em Armazenagem. UFPB. 1984. 104 p.

MOREY, R.V.; CLOUD, H.A.; NELSON, W.W. **Simulation of solar energy grain drying – Minnesota Contribution**. Agricultural Engineering Department, University of Minnesota. St. Paul, Minnesota: 1976. 43 p.

MOREY, R.V.; KEENER, H.M.; THOMPSON, T.L.; WHITE, G.M.; BAKKER-ARKEMA, F.W. **The presents staatus of grains drying simulation**. St.Joseph, Michigan: 1978. 24 p. (ASAE PAPER 78-3009).

MOHSEININ, N.N. **Physical proprieties of plant and animal materiais**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1980, 734 p.

NOOMHORM, A; VERMA, L. R. **Deep-bed rice drying simulation**. Califórnia: Califórnia Polytechnic Institute, 1986 (ASAE PAPER 86.3058).

OLIVEIRA, J. R. **Determinação das isotermas de dessecção do feijão macassar**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 23p. 2004 (Relatório Preliminar de Tese de Doutorado)

OTHMER, D. F. Correlating vapor pressure latent heat data. **Industrial and Engineering Chemistry**. v. 32, n. 6, p. 841-846. 1940.

PAGE, C. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layer**. MSc Thesis, Purdue University, USA. 1949.

PRADO, M. M.; SARTORI.; D. J. M. Estudo do fenômeno do encolhimento durante a secagem de sementes com diferentes características superficiais. **Revista Universidade Rural, série ciências exatas e da terra**. v. 21, p. 11-20, 2002

QUEIROZ, D. M.; PEREIRA, J.A.M.; MELO, E.C. **Modelos matemáticos de simulação de secagem de grãos**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, CETREINAR, 1985. 56 p.

QUEIROZ, M. R.; NEBRA, S. A. Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of bananas. **Journal of Food Engineering**, v. 47, p. 127-132, 2001.

RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of food in dehydration. In RAO, M. A.; RIZVI, S.S.H. **Engineering Properties of Foods**. New York: Marcel Dekker, Inc. 1986 p. 133-214.

ROA, G.; ROSSI, S. J. Determinação experimental de curvas de teor de umidade de equilíbrio mediante a medição de umidade relativa de equilíbrio. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG: v. 2, n. 2, p. 17-22, 1977.

RODRIGUES-ARIAS, J.H. Heat of vaporization for shelled com. **Agricultural Engineering**. p. 677-683. 1963.

ROSKO, J. S. **Digital simulation of physical systems**. Addison-Wesley Publishing Company, Massachuset: p. 427, 1972.

SILVA, C. E. L. L. **Caracterização física de grãos e vagens verdes de quatro variedades de feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L) Walp):** Fígado de galinha, corujinha, manteiguinha e vajião. 1999. 56 f. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal da Paraíba, Areia, 1999.

SILVA, J.S.S. **Pré-processamento de produtos agrícolas.** Juiz de Fora, MG: Instituto Maria, 1995. 500p.

SINÍCIO, R. **Simulação de secagem de milho em camada espessa a baixas temperaturas.** 1983. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1983.

SINÍCIO, R.; PINHEIRO FILHO, J.B.; FORTES, M.; DALPASQUALE, V.A. Comparação de modelos matemáticos para a simulação de secagem de milho a baixas temperaturas. **Revista Brasileira de Armazenamento.** Viçosa, MG: v. 11, n. 1, p 36-42, 1986.

STATISTICA for Windows 5.0. **Computer Program Manual.** Tulsa, OK: StatSoft, Inc., 1995.

TASCON, C. E. O. **Simulação de secagem de café em camada fixa com inversão de sentido de fluxo de ar.** 1984. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1984.

THOMPSON, T.L. Temporary storage of high moisture shelled corn using continuous aeration. **Transactions of the ASAE,** St. Joseph, Michigan, v. 15, n. 2, p. 333-337, 1972.

THOMPSON, T.L.; PEART, R.M.; FOSTER, G.H. Mathematical simulation of drying – A new model. **Transactions of the ASAE,** St. Joseph, v. 11, n. 4, p. 582-586, July/Aug. 1968.

TIPLER, P.A. **Física I.** Rio de Janeiro: Guanabara Dois. 2ª Ed. 1984. 596p.

VILELA, E. R. **Secagem de café em terreiro e silo com energia solar.** 1977. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1977.

WANG, N.; BRENNAM, J. G. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 24, p. 61-76, 1996.

WHILHELM, L.R. Numerical calculation of psychrometric properties. In: SI units. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan: v. 19, n. 2, p. 318-325, 1976.

APÊNDICE A
(PROGRAMA FONTE)

```
unit SasgMThompsonFixaU1;
```

```
interface
```

```
uses
```

```
Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,  
StdCtrls, Mylabel, Buttons, ExtCtrls, ComCtrls, Grids, Math, Db,  
DBTables, DBCtrls, DBGrids, PackTable;
```

```
type
```

```
TSasgMThompsonFixa = class(TForm)  
  myLabel3d7: TmyLabel3d;  
  ComboBox3: TComboBox;  
  PageControl1: TPageControl;  
  TabSheet1: TTabSheet;  
  Panel1: TPanel;  
  Label1: TLabel;  
  Label2: TLabel;  
  Label3: TLabel;  
  SpeedButton2: TSpeedButton;  
  Label4: TLabel;  
  Label9: TLabel;  
  Label10: TLabel;  
  Label11: TLabel;  
  Label12: TLabel;  
  Label13: TLabel;  
  Label27: TLabel;  
  Label28: TLabel;  
  Label29: TLabel;  
  Label30: TLabel;  
  Label31: TLabel;  
  Label32: TLabel;  
  Label33: TLabel;  
  Label34: TLabel;  
  Label35: TLabel;  
  Label36: TLabel;  
  Label37: TLabel;  
  Edit1: TEdit;  
  Edit2: TEdit;  
  Edit3: TEdit;  
  Edit4: TEdit;  
  Edit9: TEdit;  
  Edit10: TEdit;  
  Edit11: TEdit;  
  Edit12: TEdit;  
  Edit13: TEdit;  
  TabSheet2: TTabSheet;  
  Panel2: TPanel;  
  Label5: TLabel;  
  Label6: TLabel;
```

Label7: TLabel;
SpeedButton1: TSpeedButton;
Label8: TLabel;
Label14: TLabel;
Label15: TLabel;
Label16: TLabel;
Label17: TLabel;
Label18: TLabel;
Label25: TLabel;
Label26: TLabel;
Label46: TLabel;
Label47: TLabel;
Label48: TLabel;
Label49: TLabel;
Label50: TLabel;
Label51: TLabel;
Label52: TLabel;
Label53: TLabel;
Label54: TLabel;
Edit5: TEdit;
Edit6: TEdit;
Edit7: TEdit;
Edit8: TEdit;
Edit14: TEdit;
Edit15: TEdit;
Edit16: TEdit;
Edit17: TEdit;
Edit18: TEdit;
SG1: TStringGrid;
Panel3: TPanel;
Label55: TLabel;
Label56: TLabel;
Label57: TLabel;
Label60: TLabel;
Label59: TLabel;
Label58: TLabel;
Label61: TLabel;
Label66: TLabel;
Label65: TLabel;
Label62: TLabel;
Label63: TLabel;
Label67: TLabel;
Label64: TLabel;
Label68: TLabel;
Panel4: TPanel;
Label39: TLabel;
Label40: TLabel;
Label41: TLabel;
Label42: TLabel;
Label19: TLabel;
Label20: TLabel;
Label21: TLabel;

```

Label22: TLabel;
Label23: TLabel;
Label38: TLabel;
Label70: TLabel;
Label71: TLabel;
Label72: TLabel;
Label24: TLabel;
SpeedButton3: TSpeedButton;
SpeedButton4: TSpeedButton;
SpeedButton5: TSpeedButton;
SpeedButton6: TSpeedButton;
SpeedButton7: TSpeedButton;
SpeedButton8: TSpeedButton;
DSSasg: TDataSource;
Sasg: TPackTable;
com_h: TRadioGroup;
SasgHORA: TFloatField;
SasgBS1: TFloatField;
SasgTEMP1: TFloatField;
SasgBS2: TFloatField;
SasgTEMP2: TFloatField;
SasgBS3: TFloatField;
SasgTEMP3: TFloatField;
SasgBS4: TFloatField;
SasgTEMP4: TFloatField;
SasgBS5: TFloatField;
SasgTEMP5: TFloatField;
SasgBS6: TFloatField;
SasgTEMP6: TFloatField;
SasgBS7: TFloatField;
SasgTEMP7: TFloatField;
SasgBS8: TFloatField;
SasgTEMP8: TFloatField;
SasgBS9: TFloatField;
SasgTEMP9: TFloatField;
SasgBS10: TFloatField;
SasgTEMP10: TFloatField;
SasgMEDIA: TFloatField;
SasgVOLUME: TFloatField;
// procedure Srp3(Sender: double);
procedure FormShow(Sender: TObject);
procedure SpeedButton2Click(Sender: TObject);
procedure SpeedButton5Click(Sender: TObject);
procedure Edit1KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit2KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit3KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit4KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit9KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit10KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit11KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit12KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit13KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);

```

```

procedure FormKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure ComboBox3Click(Sender: TObject);
procedure SpeedButton1Click(Sender: TObject);
procedure Edit17KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure SpeedButton3Click(Sender: TObject);
procedure SpeedButton4Click(Sender: TObject);
procedure SpeedButton7Click(Sender: TObject);
procedure SpeedButton8Click(Sender: TObject);
procedure SpeedButton6Click(Sender: TObject);
procedure Edit5KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit6KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit7KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit8KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit14KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit15KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit16KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit18KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure PageControl1Change(Sender: TObject);
procedure com_hClick(Sender: TObject);
private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
end;

var
  SasgMThompsonFixa: TSasgMThompsonFixa;
  com_h, camada, ar, passo, x, cont : Integer;
  mo, go, to1, ho, gar, mf, l, dt, m1, m2, m3, m4, g1, g2, g3, g4, mfinal, tbs,
  tbu, ur, vesp, r,t1, m, g, t, h, tf, med, cp, urel, me, mr, a, b, teq, dh, e,
  hf, dhfg, tabs, pv, pvsf, tq, nep, patm, pwbu, hbu, pwbs, pw, tpo, tbuq, pvs,
  altura, delta_l, volm, urq, pvp, hfo, tfo, q, rh, tlinha, tlinha2 : Double;
  eme : array [0..10] of Double;
  ge : array[0..10] of Double;
  alturax : array[0..10] of Double;
  media : array[0..10] of Double;
  ub_s_1 : array[0..10, 0..10] of Double;
  temp_1 : array[0..10, 0..10] of Double;
  Sasg1 : array[0..100, 0..22] of Double;
  // Variáveis da Função
  modelo, aux1, grao, palavra, parte1, parte2 : String;
  a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3, b4, aux, volta : Double;
  // Variação da Altura
  Umidade_Inicial, Altura_Inicial : Double;
  comh, i, j, k, trata, tamanho : Integer;
  chave1, parar1, chave2, chave3 : Integer;
  pagina, lin, col, colunas : Integer;
  tbsg, resto : Double;
  parada_errada, de_onde_vem : Integer;
  npar, ncont, indice : Integer;

```

implementation

```

uses SasgMThompsonFixaUrPrvU1, Graf_Thompson_FixaU1,
  SasgMThompsonFixa4PrvU1, SasgMThompsonFixa5PrvU1, SasgMThompsonFixa6PrvU1,
  SasgMThompsonFixa7PrvU1, SasgMThompsonFixa8PrvU1, SasgMThompsonFixa9PrvU1,
  SasgMThompsonFixa10PrvU1;

```

```
{ $R *.DFM }
```

```

{
*****
*****
***** Sistema ...: Simulador de Secagem de grãos *****
***** Analista ..: Luis Antonio Dantas *****
***** Programador: Luis Antonio Dantas *****
***** Programa ..: Secagem em Leito Fixo - Thompson *****
***** Entidade ..: UFPb/PRAI/CCT/DEAg/LAPPA *****
*****
*****
*****}

```

```

{
*****
*** Cahamada da Função de Conversão ***
*****}

```

```
Function Edita(Palavra : String) : Double;
```

```
begin
```

```
  parte1 := "";
```

```
  parte2 := "";
```

```
  tamanho := 0;
```

```
  tamanho := Length(palavra);
```

```
  for i := 1 to tamanho do
```

```
    if (Copy(palavra,i,1) = '.') then
```

```
      begin
```

```
        j := i - 1;
```

```
        k := i + 1;
```

```
        parte1 := Copy(palavra,1,j);
```

```
        parte2 := Copy(palavra,k,(tamanho-(j + 1)));
```

```
        Break;
```

```
      end;
```

```
  tamanho := Length(parte2);
```

```
  if (tamanho > 0) then
```

```
    begin
```

```
      if (tamanho = 1) then
```

```
        trata := 10
```

```
      else if (tamanho = 2) then
```

```
        trata := 100
```

```
      else if (tamanho = 3) then
```

```
        trata := 1000
```

```
      else if (tamanho = 4) then
```

```
        trata := 10000;
```

```
      palavra := parte1 + parte2;
```

```
      volta := StrToFloat(palavra)/trata;
```

```
    end
```

```
  else
```

```

volta := StrToInt(palavra);
Result := volta;
end;
{*****}
*** Fim da Função de Conversão ***
*****}

```

```

Function pvsfl(tlinha : Double) : Double;
begin
nep := 2.71828182845904523536028747135266;
tabs := (tlinha + 273.16);
a := ((-7511.52/tabs)+89.63121+(0.02399897*tabs));
a := (a-(12.150799*(LogN(nep, tabs)))+(2.0998405*(1/Power(10, 11)))*(Power(tabs, 4))));
a := (a-(1.1654551*(1/Power(10, 5)))*(Power(tabs, 2)))-(1.2810336*(1/Power(10,
8))*(Power(tabs, 3))));
pvsf := EXP(a)/0.1333;
Result := pvsf;
end;

```

```

Function apend22(tlinha2 : Double) : Double;
begin
parar1 := 1;
chavel := 1;
while (parar1 = 1) do
begin
tlinha := tbs;
pvs := pvsfl(tlinha);
pvp := ur*pvs/100;
if (ar > 0) then
h := (0.622*pvp)/(patm-pvp);
e := (0.24 * tbs) + ((597.6 + (0.45 * tbs)) * h);
dt := 5.0;
tbu := tbs;
while (chavel = 1) do
begin
tbu := (tbu-dt);
hbu := (e-(4.26+(0.24*tbu)))/(597.6+(0.45*tbu));
tlinha := tbu;
pvs := pvsfl(tlinha);
rh := (patm*hbu)/(pvs*(0.622+hbu));
if (rh > 1.0) then
if (rh <= 1.0) then
if (rh <= 0.99) then
Continue
else
begin
tbu := (tbu+dt);
dt := (dt*0.5);
Continue;
end;
Break;
end;
end;
end;

```



```

tlinha := tbs;
pvs := pvsf1(tlinha);
pw := (pvs*ur*0.1333)/100;
a := LogN(nep, pw);
if (tbs <= 50) then
  tpo := 6.983+(14.38*a)+(1.079*(a*a))
else
  tpo := 13.80+(9.578*a)+(1.991*(a*a));
vesp := (2.153*(tbs+273.16)*(1+(1.6078*h)))/patm;
if (ar = 1) then
  begin
    tlinha := tq;
    pwbs := pvsf1(tlinha);
    urq := (100*h*patm)/(pwbs*(h+0.622));
    tbs := tq;
    ur := urq;
    ar := 0;
    Continue;
  end
else
  Break;
end;
Result := vesp;
end;

```

Function apendl1(tlinha : Double) : Double;

```

begin
  parar1 := 1;
  chavel := 1;
  while (parar1 = 1) do
    begin
      tlinha := tbu;
      pwbu := pvsf1(tlinha);
      hbu := (0.622*pwbu)/(patm-pwbu);
      if (ar > 0) then
        h := (((2501-(2.411*tbu))*hbu)-(1.006*(tbs-tbu)))/(2501+(1.775*tbs)-(4.186*tbu));
      tlinha := tbs;
      pwbs := pvsf1(tlinha);
      ur := (h*patm*100.0)/(pwbs*(h+0.622));
      pw := (pwbs*ur*0.1333)/100.0;
      a := LogN(nep, pw);
      if (tbs <= 50.00) then
        tpo := (6.983+(14.38*a)+(1.079*(Power(a, 2))))
      else
        tpo := (13.8+(9.478*a)+(1.991*(Power(a, 2))));
      e := (0.24*tbs)+((597.6+(0.45*tbs))*h);
      vesp := (2.153*(tbs+273.16)*(1+(1.6078*h)))/patm;
      if (ar = 1) then
        begin
          e := (0.24*tbs)+((597.6+(0.45*tbs))*h) + 4.26;
          ar := 0;
          dt := 5.00;
        end
      end;
    end;
  end;

```

```

tbuq := tq;
while (chave1 = 1) do
  begin
    tbuq := (tbuq - dt);
    hbu := (e-(4.26+(0.24*tbuq)))/(597.6+(0.45*tbuq));
    tlinha := tbuq;
    pvs := pvsf1(tlinha);
    rh := (patm*hbu)/(pvs*(0.622+hbu));
    if (rh = 1.00) then
      Continue
    else
      if (rh <= 1.00)then
        if (rh <= 0.99) then
          Continue
        else
          begin
            chave1 := 0;
            break;
          end
        else
          begin
            tbuq := tbuq + dt;
            dt := dt * 0.5;
            Continue;
          end;
        end;
      end;
    tbs := tq;
    tbu := tbuq;
    Continue;
  end
end
else
  begin
    parar1 := 0;
    Break;
  end;
end;
{*****}
***** SubRotina APEND11 *****
{*****}
Result := vesp;
end;

```

```

procedure TSasgMThompsonFixa.FormShow(Sender: TObject);
var
  Camadas, Col, Row: Integer;
begin
  com_h.ItemIndex := 0;
  comh := 0;
  pagina := 1;
  Sasg.Open;
  if (Sasg.RecordCount > 0) then
    begin

```

```

while Sasg.RecordCount > 0 do
  begin
    Sasg.Delete;
    Sasg.Next;
  end;
  Sasg.Pack;
end;
altura := 0.00;
delta_1 := 0.00;
de_onde_verm := 0;
modelo := "";
nep := 2.71828182845904523536028747135266;
// Bulbo Seco - Bulbo Umido
Edit1.Text := '24';
Edit2.Text := '20';
Edit3.Text := '760';
Edit4.Text := '60';
Edit9.Text := '182';
Edit10.Text := '20';
Edit11.Text := '30';
Edit12.Text := '0.63';
Edit13.Text := '1.0';
// Bulbo Seco - Umidade Relativa
Edit5.Text := '22';
Edit6.Text := '67';
Edit7.Text := '720';
Edit8.Text := '60';
Edit14.Text := '230';
Edit15.Text := '30';
Edit16.Text := '20';
Edit17.Text := '0.63';
Edit18.Text := '1.0';
ComboBox3.Text := '4';
camada := 4;
colunas := (camada * 2) + 3;
//grao := 'Milho Comum';
grao := 'Feijão Macassar';
(Sasg.FieldByName('BS1') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';
(Sasg.FieldByName('BS2') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';
(Sasg.FieldByName('BS3') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';
(Sasg.FieldByName('BS4') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';
(Sasg.FieldByName('BS5') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';
(Sasg.FieldByName('BS6') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';
(Sasg.FieldByName('BS7') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';
(Sasg.FieldByName('BS8') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';
(Sasg.FieldByName('BS9') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';
(Sasg.FieldByName('BS10') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';
(Sasg.FieldByName('TEMP1') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';
(Sasg.FieldByName('TEMP2') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';
(Sasg.FieldByName('TEMP3') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';
(Sasg.FieldByName('TEMP4') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';
(Sasg.FieldByName('TEMP5') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';

```

```

(Sasg.FieldByName('TEMP6') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';
(Sasg.FieldByName('TEMP7') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';
(Sasg.FieldByName('TEMP8') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';
(Sasg.FieldByName('TEMP9') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';
(Sasg.FieldByName('TEMP10') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';
(Sasg.FieldByName('MEDIA') As TFloatField).DisplayFormat := '##.00';
(Sasg.FieldByName('VOLUME') As TFloatField).DisplayFormat := '##.0000';
// Dimensionamento do String Grid
SG1.FixedCols := 1;
SG1.FixedRows := 1;
case colunas of
    8: SG1.Width := 285;
    10: SG1.Width := 350;
    12: SG1.Width := 417;
    14: SG1.Width := 483;
    16: SG1.Width := 549;
    18: SG1.Width := 615;
    20: SG1.Width := 681;
    22: SG1.Width := 747;
else
    SG1.Width := 350;
end;
if((colunas*38) > 745) then
    SG1.Width := 745
else
    SG1.Width := colunas * 38;
SG1.RowCount := 1000;
SG1.ColCount := colunas;
SG1.Height := 193;
SG1.Cells[0, 0] := 'Hora';
SG1.Font.Color := clNavy;
SG1.Font.Style := [fsBold];
ncont := 1;
npar := 1;
for i := 1 to (colunas - 3) do
    begin
        resto := i mod 2;
        if (resto < 0.00) then
            SG1.Cells[i, 0] := IntToStr(ncont)+'ra Bs'
        else
            SG1.Cells[i, 0] := IntToStr(ncont)+'ra T';
        if (i = (2*ncont)) then
            ncont := ncont + 1;
    end;
SG1.Cells[(colunas-2), 0] := 'Média';
SG1.Cells[(colunas-1), 0] := 'Altura';
SG1.Font.Style := [];
com_h.ItemIndex := 0;
com_h := 0;
PageControl1.ActivePage := TabSheet1;
SpeedButton2.Click;
end;

```

```

procedure TSasgMThompsonFixa.SpeedButton2Click(Sender: TObject);
begin
  parada_errada := 0;
  if (Sasg.RecordCount > 0) then
    begin
      while Sasg.RecordCount > 0 do
        begin
          Sasg.Delete;
          Sasg.Next;
        end;
      Sasg.Pack;
    end;
  de_onde_vem := 1;
  modelo := 'Bulbo Seco/Bulbo Úmido';
  if (ComboBox3.Text = 'Camada') then
    begin
      MessageDlg('Você ESQUECEU de Selecionar o N° de Camadas!!!', mtInformation,
[mbOk], 0);
      ComboBox3.SetFocus;
    end;
  SG1.Font.Style := [];
  delta_1 := 0.00;
  altura := 0.00;
  m1 := 0.00;
  m2 := 0.00;
  m3 := 0.00;
  m4 := 0.00;
  g1 := 0.00;
  g2 := 0.00;
  g3 := 0.00;
  g4 := 0.00;
  t1 := 0.00;
  m := 0.00;
  g := 0.00;
  t := 0.00;
  h := 0.00;
  tf := 0.00;
  med := 0.00;
  cp := 0.00;
  urel := 0.00;
  me := 0.00;
  mr := 0.00;
  a := 0.00;
  b := 0.00;
  teq := 0.00;
  dh := 0.00;
  hf := 0.00;
  dhfg := 0.00;
  tabs := 0.00;
  pv := 0.00;
  pvsf := 0.00;

```

```

tq := 0.00;
mfinal := 0.00;
tbs := 0.00;
tbu := 0.00;
ur := 1.00;
vesp := 0.00;
r := 0.00;
volm := 0.00;
for i:= 0 to camada do
  begin
    eme[i] := 0.00;
    ge[i] := 0.00;
  end;
x := 1;
cont := 1;
ar := 1;
mo := 0.00;
go := 0.00;
to1 := 0.00;
ho := 0.00;
gar := 0.00;
mf := 0.00;
l := 0.00;
dt := 0.00;
//tbs := 1.0 * StrToFloat(Edit1.Text);
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit1.Text;
tbs := Edita(palavra);
//tbu := 1.0 * StrToFloat(Edit2.Text);
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit2.Text;
tbu := Edita(palavra);
//patm := 1.0 * StrToFloat(Edit3.Text);
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit3.Text;
patm := Edita(palavra);
//tq := 1.0 * StrToFloat(Edit4.Text);
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit4.Text;
tq := Edita(palavra);
//mo :=1.0 * StrToFloat(Edit9.Text);
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit9.Text;
mo := Edita(palavra);
//gar :=1.0 * StrToFloat(Edit10.Text);
trata := 0;
palavra := "";

```

```

palavra := Edit10.Text;
gar := Edita(palavra);
//mfinal :=1.0 * StrToFloat(Edit11.Text);
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit11.Text;
mfinal := Edita(palavra);
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit12.Text;
l := Edita(palavra);
delta_1 := l;
altura := l;
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit13.Text;
dt := Edita(palavra);
// Início do controle de variação da altura
Umidade_Inicial := mo;
Altura_Inicial := l;
// fim
// Tratamento do valor da Temperatura do Ar Aquecido
{if (tq < 35) then
  begin
    ShowMessage('Este Sistema esta dimensionado para Temperaturas no intervalo: [35 a
65] Graus Centigrados');
    Edit4.SetFocus;
  end
else if (tq > 65) then
  begin
    ShowMessage('Este Sistema esta dimensionado para Temperaturas no intervalo: [35
a 45] e [55 a 65] Graus Centigrados');
    Edit4.SetFocus;
  end;}
//
tlinha := tbs;
Label39.Caption := FormatFloat('##0.####', tbs);
tbsg := tbs;
go := apendl1(tlinha);
to1 := tq;
ho := h;
Label40.Caption := FormatFloat('##0.####', to1);
Label41.Caption := FormatFloat('##0.####', h);
Label42.Caption := FormatFloat('##0.####', vesp);
i := 1;
while (i <= camada) do
  begin
    eme[i] := mo;
    ge[i] := go;
    i := i + 1;
  end;
trata := 0;

```

```

palavra := "";
palavra := Edit13.Text;
dt := Edita(palavra);
r := (520*1*vesp)/(gar*dt*camada*60);
t1 := 0.00;
lin := 0;
col := 0;
x := 1;
while (x = 1) do
begin
if (comh = 0) then
begin
r := (520*altura*vesp)/(gar*dt*camada*60);
end
else
altura := 0;
t := to1;
h := ho;
t1 := t1 + dt;
lin := lin + 1;
col := 0;
SG1.Cells[col,lin] := '+' + FormatFloat('##.##',t1)+'a';
sasg1[col,lin] := t1;
if (tf >= tq) then
begin
parada_errada := lin;
ShowMessage('Temperatura > ' + FormatFloat('##', tq) + ' Temp. do Ar Aquecido');
Break;
end;
Sasg.Insert;
Sasg.Edit;
SasgHORA.Value := Round(t1);
Sasg.Post;
med := 0.00;
i := 1;
while (i <= camada) do
begin
m := eme[i];
q := ge[i];
{*****}
*** SubRotina - SRP3
*****}
//Srp3;
chave2 := 0;
cp := (((0.357+(0.00178*(m/(100+m))))*r)*(1+(0.01*m)));
t := (((0.24+(0.45*h))*t)+(cp*q))/(0.24+(0.45*h)+cp);
mf := m;
// Chamada da Procedure DO urel3
tabs := t + 273.16;
pv := (14.696*h)/(0.6219+h);
pvs := EXP(51.594-(6834/tabs)-(5.16927*LogN(nep, tabs)));
urel := pv/pvs;

```



```

// Fim de urel3
ur := urel;
if (ur >= 0.9) then
  chave2 := 2
else
  begin
    // me de Jorge
    me := Power(Ln(1-ur)/(-0.009688*Power(t,0.276015)),0.755301);
    mr := Ln((m-me)/(mo-me));
    a := (-891.151+(24.721*t)+(-0.886*mo)+(-
0.198*t*t)+(0.019*t*mo)+(0.00071*mo*mo))/60;
    b := (79.959+(2.15*t)+(0.078*mo)-(0.015*t*t)+(-
0.003*t*mo)+(0.00089*mo*mo))/60;
    teq := (a*mr) + (b*(mr*mr)) + dt;
    mf := (((EXP((-a)-(SQRT((a*a)+(4*b*teq)))/(2*b)))*(mo-me))+me);
    //*****
    teq := teq + dt;
    //*****
    dh := (r*(m-mf))/100;
    hf := h + dh;
    dhfg := (606-(0.57*t))*(((1+0.23822)*EXP(-0.0469*m))/4.186);
    tf := (((0.24+(0.45*h))*t)-(dh*(587.9+(dhfg-t)))+(cp*t))/(0.24+(0.45*hf)+cp));
    h := hf;
    t := tf;
    // Chamada da Procedure DO urel3
    tabs := t + 273.16;
    pv := (14.696*h)/(0.6219+h);
    pvs := EXP(51.594-(6834/tabs)-(5.16927*LN(tabs)));
    urel := pv/pvs;
    // Fim de urel3
    ur := urel;
    if (ur >= 1.0) then
      chave2 := 2
    else
      begin
        col := col + 1;
        SG1.Cells[col,lin] := FormatFloat('##.00',mf);
        ubs_1[i, Round(t1)] := mf;
        col := col + 1;
        SG1.Cells[col,lin] := FormatFloat('##.00',t);
        temp_1[i, Round(t1)] := t;
        Sasg.Edit;
        case i of
          1: begin
              SasgBS1.Value := mf;
              SasgTEMP1.Value := t;
            end;
          2: begin
              SasgBS2.Value := mf;
              SasgTEMP2.Value := t;
            end;
          3: begin

```

```

        SasgBS3.Value := mf;
        SasgTEMP3.Value := t;
    end;
4: begin
    SasgBS4.Value := mf;
    SasgTEMP4.Value := t;
    end;
5: begin
    SasgBS5.Value := mf;
    SasgTEMP5.Value := t;
    end;
6: begin
    SasgBS6.Value := mf;
    SasgTEMP6.Value := t;
    end;
7: begin
    SasgBS7.Value := mf;
    SasgTEMP7.Value := t;
    end;
8: begin
    SasgBS8.Value := mf;
    SasgTEMP8.Value := t;
    end;
9: begin
    SasgBS9.Value := mf;
    SasgTEMP9.Value := t;
    end;
10: begin
    SasgBS10.Value := mf;
    SasgTEMP10.Value := t;
    end;
end;
Sasg.Post;
if (tf >= tq) then
    begin
        parada_errada := lin;
        ShowMessage('Temperatura > '+FormatFloat('###', tq)+' Temp. do Ar
Aquecido');

        chave2 := 0;
        chave3 := 0;
        Break;
    end;
end;
while (chave2 = 2) do
    begin
        tfo := t;
        hfo := h;
        chave3 := 3;
        while (chave3 = 3) do
            begin
                t := t + 1;

```

```

h := ((0.24*(tfo-t))+((588-(0.55*tfo))*hfo)+(cp*(tfo-t)))/(588+(0.45*t)-tfo);
// Chamada da Procedure DO urel3
tabs := t + 273.16;
pv := (14.696*h)/(0.6219+h);
pvs := EXP(51.594-(6834/tabs)-(5.16927*LogN(nep, tabs)));
urel := pv/pvs;
// Fim de urel3
ur := urel;
if (ur >= 0.9) then
  Continue
else
  begin
    col := col + 1;
    mf := mf-((100*(h-hfo))/r);
    SG1.Cells[col,lin] := FormatFloat('##.00',mf);
    ubs_1[i, Round(t1)] := mf;
    col := col + 1;
    SG1.Cells[col,lin] := FormatFloat('##.00',t);
    temp_1[i, Round(t1)] := t;
    Sasg.Edit;
    case i of
      1: begin
          SasgBS1.Value := mf;
          SasgTEMP1.Value := t;
        end;
      2: begin
          SasgBS2.Value := mf;
          SasgTEMP2.Value := t;
        end;
      3: begin
          SasgBS3.Value := mf;
          SasgTEMP3.Value := t;
        end;
      4: begin
          SasgBS4.Value := mf;
          SasgTEMP4.Value := t;
        end;
      5: begin
          SasgBS5.Value := mf;
          SasgTEMP5.Value := t;
        end;
      6: begin
          SasgBS6.Value := mf;
          SasgTEMP6.Value := t;
        end;
      7: begin
          SasgBS7.Value := mf;
          SasgTEMP7.Value := t;
        end;
      8: begin
          SasgBS8.Value := mf;
          SasgTEMP8.Value := t;
        end;
    end;
  end;
end;

```

```

        end;
    9: begin
        SasgBS9.Value := mf;
        SasgTEMP9.Value := t;
    end;
    10: begin
        SasgBS10.Value := mf;
        SasgTEMP10.Value := t;
    end;
end;
Sasg.Post;
if (tf >= tq) then
begin
    parada_errada := lin;
    ShowMessage('Temperatura > '+FormatFloat('##', tq)+' Temp. do Ar
Aquecido');

    Break;
end;
chave3 := 0;
chave2 := 0;
Break;
end;
end;
end;
{*****}
*** Fim de SRP3
{*****}
// DO SRP3
eme[i] :=mf;
ge[i] := t;
i := i + 1;
end;
i := 1;
while (i <= camada) do
begin
    med := med + eme[i];
    i := i + 1;
end;
med := med/camada;
col := col + 1;
SG1.Cells[col,lin] := FormatFloat('##.00',med);
indice := Round(t1);
media[indice] := med;
col := col + 1;
if (comh = 0) then
begin
    // calculo do decremento da altura
    delta_1 := (100 * med)/Umidade_Inicial;
    delta_1 := (100 - delta_1)/0,628;
    delta_1 := (delta_1 * Altura_Inicial)/100;
    delta_1 := Altura_Inicial - delta_1;
    altura := delta_1;

```

```

        // fim
        SG1.Cells[col,lin] := FormatFloat('##.0000',altura);
        alturax[indice] := altura;
    end
else
    begin
        altura := 0.00;
        SG1.Cells[col,lin] := FormatFloat('##.0000', altura);
        alturax[indice] := altura;
    end;
    Sasg.Edit;
    SasgMEDIA.Value := med;
    SasgVOLUME.Value := altura;
    Sasg.Post;
    if (med < mfinal) then
        begin
            x := 0;
            Break;
        end;
    end;
    t1 := t1 + 1;
    i := Round(t1);
    if (parada_errada <> 0) then
        i := parada_errada;
    SG1.RowCount := Round(i);
    case i of
        2: SG1.Height := 45;
        3: SG1.Height := 65;
        4: SG1.Height := 88;
        5: SG1.Height := 108;
        6: SG1.Height := 130;
        7: SG1.Height := 151;
        8: SG1.Height := 171;
        9: SG1.Height := 193;
    else
        SG1.Height := 209;
    end;
    SG1.SetFocus;
end;

procedure TSasgMThompsonFixa.SpeedButton5Click(Sender: TObject);
begin
    if (Sasg.RecordCount > 0) then
        begin
            while Sasg.RecordCount > 0 do
                begin
                    Sasg.Delete;
                    Sasg.Next;
                end;
            Sasg.Pack;
        end;
    Sasg.Close;
end;

```

```
Close;  
end;
```

```
procedure TSasgMThompsonFixa.Edit1KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
  if (Key = ',') then  
    Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasgMThompsonFixa.Edit2KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
  if (Key = ',') then  
    Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasgMThompsonFixa.Edit3KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
  if (Key = ',') then  
    Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasgMThompsonFixa.Edit4KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
  if (Key = ',') then  
    Key := '!';  
  if (key = #13) then  
    begin  
      trata := 0;  
      palavra := '';  
      palavra := Edit4.Text;  
      tq := Edita(palavra);  
    end;  
end;
```

```
procedure TSasgMThompsonFixa.Edit9KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
  if (Key = ',') then  
    Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasgMThompsonFixa.Edit10KeyPress(Sender: TObject;  
  var Key: Char);  
begin  
  if (Key = ',') then  
    Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasgMThompsonFixa.Edit11KeyPress(Sender: TObject;  
  var Key: Char);  
begin  
  if (Key = ',') then  
    Key := '!';
```

```
end;
```

```
procedure TSasgMThompsonFixa.Edit12KeyPress(Sender: TObject;  
  var Key: Char);  
begin  
  if (Key = ',') then  
    Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasgMThompsonFixa.Edit13KeyPress(Sender: TObject;  
  var Key: Char);  
begin  
  if (Key = ',') then  
    Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasgMThompsonFixa.FormKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
  if (Key = #13) then  
    SelectNext(ActiveControl, True, True);  
end;
```

```
procedure TSasgMThompsonFixa.ComboBox3Click(Sender: TObject);  
begin  
  columnas := 0;  
  camada := 0;  
  camada := StrToInt(ComboBox3.Text);  
  columnas := (camada * 2) + 3;  
  SG1.FixedCols := 1;  
  SG1.FixedRows := 1;  
  case columnas of  
    8: SG1.Width := 285;  
    10: SG1.Width := 350;  
    12: SG1.Width := 417;  
    14: SG1.Width := 483;  
    16: SG1.Width := 549;  
    18: SG1.Width := 615;  
    20: SG1.Width := 681;  
    22: SG1.Width := 747;  
  else  
    SG1.Width := 285;  
  end;  
  if ((columnas*38) > 745) then  
    SG1.Width := 745  
  else  
    SG1.Width := columnas * 38;  
  SG1.RowCount := 1000;  
  SG1.ColCount := columnas;  
  SG1.Height := 193;  
  SG1.Cells[0, 0] := 'Hora';  
  SG1.Font.Color := clNavy;  
  SG1.Font.Style := [fsBold];
```

```

ncont := 1;
npar := 1;
for i := 1 to (colunas - 3) do
  begin
    resto := i mod 2;
    if (resto <> 0.00) then
      SG1.Cells[i, 0] := IntToStr(ncont)+'ª Bs'
    else
      SG1.Cells[i, 0] := IntToStr(ncont)+'ª T';
      if (i = (2*ncont)) then
        ncont := ncont + 1;
      end;
    SG1.Cells[(colunas-2), 0] := 'Média';
    SG1.Cells[(colunas-1), 0] := 'Altura';
    SG1.Font.Style := [];
    if (PageControl1.ActivePage = TabSheet1) then
      SpeedButton2.Click
    else
      SpeedButton1.Click;
  end;
end;

procedure TSasgMThompsonFixa.SpeedButton1Click(Sender: TObject);
begin
  parada_errada := 0;
  if (Sasg.RecordCount > 0) then
    begin
      while Sasg.RecordCount > 0 do
        begin
          Sasg.Delete;
          Sasg.Next;
        end;
      Sasg.Pack;
    end;
  de_onde_vem := 2;
  modelo := 'Bulbo Seco/Umidade Relativa';
  if (ComboBox3.Text = 'Camada') then
    begin
      MessageDlg('Você ESQUECEU de Selecionar o N° de Camadas!!!', mtInformation,
        [mbOk], 0);
      ComboBox3.SetFocus;
    end;
  delta_1 := 0.00;
  altura := 0.00;
  m1 := 0.00;
  m2 := 0.00;
  m3 := 0.00;
  m4 := 0.00;
  g1 := 0.00;
  g2 := 0.00;
  g3 := 0.00;
  g4 := 0.00;
  t1 := 0.00;

```



```

m := 0.00;
g := 0.00;
t := 0.00;
h := 0.00;
tf := 0.00;
med := 0.00;
cp := 0.00;
urel := 0.00;
me := 0.00;
mr := 0.00;
a := 0.00;
b := 0.00;
teq := 0.00;
dh := 0.00;
hf := 0.00;
dhfg := 0.00;
tabs := 0.00;
pv := 0.00;
pvsf := 0.00;
tq := 0.00;
mfinal := 0.00;
tbs := 0.00;
tbu := 0.00;
ur := 1.00;
vesp := 0.00;
r := 0.00;
for i:= 0 to camada do
  begin
    eme[i] := 0.00;
    ge[i] := 0.00;
  end;
x := 1;
cont := 1;
ar := 1;
mo := 0.00;
go := 0.00;
tol := 0.00;
ho := 0.00;
gar := 0.00;
mf := 0.00;
l := 0.00;
dt := 0.00;
//tbs := 1.0 * StrToFloat(Edit5.Text);
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit5.Text;
tbs := Edita(palavra);
//ur := 1.0 * StrToFloat(Edit6.Text);
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit6.Text;
ur := Edita(palavra);

```

```

//patm := 1.0 * StrToFloat(Edit7.Text);
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit7.Text;
patm := Edita(palavra);
//tq := 1.0 * StrToFloat(Edit8.Text);
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit8.Text;
tq := Edita(palavra);
//mo :=1.0 * StrToFloat(Edit14.Text);
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit14.Text;
mo := Edita(palavra);
//gar :=1.0 * StrToFloat(Edit15.Text);
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit15.Text;
gar := Edita(palavra);
//mfinal :=1.0 * StrToFloat(Edit16.Text);
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit16.Text;
mfinal := Edita(palavra);
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit17.Text;
l := Edita(palavra);
delta_l := l;
altura := l;
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit18.Text;
dt := Edita(palavra);
tlinha2 := tbs;
Label56.Caption := FormatFloat('##0.#####', tbs);
go := apend22(tlinha2);
to1 := tq;
ho := h;
Label59.Caption := FormatFloat('##0.#####', to1);
Label62.Caption := FormatFloat('##0.#####', h);
Label65.Caption := FormatFloat('##0.#####', vesp);
i := 1;
while (i <= camada) do
  begin
    eme[i] := mo;
    ge[i] := go;
    i := i + 1;
  end;
trata := 0;
palavra := "";

```

```

palavra := Edit13.Text;
dt := Edita(palavra);
// Inicio do controle de variação da altura
Umidade_Inicial := mo;
Altura_Inicial := l;
r := (520*altura*vesp)/(gar*dt*camada*60);
t1 := 0.00;
lin := 0;
col := 0;
x := 1;
while (x = 1) do
  begin
    if (comh = 0) then
      begin
        r := (520*altura*vesp)/(gar*dt*camada*60);
      end
    else
      altura := 0;
      t := to1;
      h := ho;
      t1 := t1 + dt;
      lin := lin + 1;
      sasg1[col,lin] := t1;
      indice := Round(t1);
      col := 0;
      SG1.Cells[col,lin] := FormatFloat('##.##',t1)+'a';
      if (tf >= tq) then
        begin
          parada_errada := lin;
          ShowMessage('Temperatura > '+FormatFloat('##', tq)+' Temp. do Ar Aquecido');
          Break;
        end;
      Sasg.Insert;
      Sasg.Edit;
      SasgHORA.Value := Round(t1);
      Sasg.Post;
      med := 0.00;
      i := 1;
      while (i <= camada) do
        begin
          m := eme[i];
          q := ge[i];
          {*****}
          *** SubRotina - SRP3
          {*****}
          // Srp3;
          chave2 := 0;
          cp := ((0.357+(0.00178*(m/(100+m))))*r)*(1+(0.01*m));
          mf := m;
          // Chamada da Procedure DO urel3
          tabs := t + 273.16;
          pv := (14.696*h)/(0.6219+h);

```

```

pvs := EXP(51.594-(6834/tabs)-(5.16927*LogN(nep, tabs)));
urel := pv/pvs;
// Fim de urel3
ur := urel;
if (ur >= 0.9) then
  chave2 := 2
else
  begin
    // me de Jorge
    me := Power(Ln(1-ur)/(-0.009688*Power(t,0.276015)),0.755301);
    mr := Ln((m-me)/(mo-me));
    a := (-891.151+(24.721*t)+(-0.886*mo)+(-
0.198*t*t)+(0.019*t*mo)+(0.00071*mo*mo))/60;
    b := (79.959+(2.15*t)+(0.078*mo)-(0.015*t*t)+(-
0.003*t*mo)+(0.00089*mo*mo))/60;
    teq := (a*mr) + (b*(mr*mr)) + dt;
    mf := (((EXP((-a)-(SQRT((a*a)+(4*b*teq))))/(2*b)))*(mo-me))+me);
    //*****
    teq := teq + dt;
    //*****
    dh := (r*(m-mf))/100;
    hf := h + dh;
    dhfg := (606-(0.57*t))*(((1+0.23822)*EXP(-0.0469*m))/4.186);
    tf := (((0.24+(0.45*h))*t)-(dh*(587.9+(dhfg-t)))+(cp*t))/(0.24+(0.45*hf)+cp));
    h := hf;
    t := tf;
    // Chamada da Procedure DO urel3
    tabs := t + 273.16;
    pv := (14.696*h)/(0.6219+h);
    pvs := EXP(51.594-(6834/tabs)-(5.16927*LN(tabs)));
    urel := pv/pvs;
    // Fim de urel3
    ur := urel;
    if (ur >= 1.0) then
      chave2 := 2
    else
      begin
        col := col + 1;
        SG1.Cells[col,lin] := FormatFloat('##.00',mf)+' ';
        ub1_1[i, Round(t1)] := mf;
        col := col + 1;
        SG1.Cells[col,lin] := FormatFloat('##.00',t)+' ';
        temp_1[i, Round(t1)] := t;
        Sasg.Edit;
        case i of
          1: begin
              SasgBS1.Value := mf;
              SasgTEMP1.Value := t;
            end;
          2: begin
              SasgBS2.Value := mf;
              SasgTEMP2.Value := t;
            end;
        end;
      end;
  end;

```

```

end;
3: begin
  SasgBS3.Value := mf;
  SasgTEMP3.Value := t;
end;
4: begin
  SasgBS4.Value := mf;
  SasgTEMP4.Value := t;
end;
5: begin
  SasgBS5.Value := mf;
  SasgTEMP5.Value := t;
end;
6: begin
  SasgBS6.Value := mf;
  SasgTEMP6.Value := t;
end;
7: begin
  SasgBS7.Value := mf;
  SasgTEMP7.Value := t;
end;
8: begin
  SasgBS8.Value := mf;
  SasgTEMP8.Value := t;
end;
9: begin
  SasgBS9.Value := mf;
  SasgTEMP9.Value := t;
end;
10: begin
  SasgBS10.Value := mf;
  SasgTEMP10.Value := t;
end;
end;
Sasg.Post;
if (tf >= tq) then
begin
  parada_errada := lin;
  ShowMessage('Temperatura > '+FormatFloat('###', tq)+' Temp. do Ar
Aquecido');
  chave2 := 0;
  chave3 := 0;
  Break;
end;
end;
end;
while (chave2 = 2) do
begin
  tfo := t;
  hfo := h;
  chave3 := 3;
  while (chave3 = 3) do

```

```

begin
  t := t + 1;
  h := ((0.24*(tfo-t))+((588-(0.55*tfo))*hfo)+(cp*(tfo-t)))/(588+(0.45*t)-tfo);
  // Chamada da Procedure DO urel3
  tabs := t + 273.16;
  pv := (14.696*h)/(0.6219+h);
  pvs := EXP(51.594-(6834/tabs)-(5.16927*LogN(nep, tabs)));
  urel := pv/pvs;
  // Fim de urel3
  ur := urel;
  if (ur >= 0.9) then
    Continue
  else
    begin
      col := col + 1;
      mf := mf-((100*(h-hfo))/r);
      SG1.Cells[col,lin] := FormatFloat('##.00',mf)+' ';
      ubs_1[i, Round(t1)] := mf;
      col := col + 1;
      SG1.Cells[col,lin] := FormatFloat('##.00',t)+' ';
      temp_1[i, Round(t1)] := t;
      Sasg.Edit;
      case i of
        1: begin
            SasgBS1.Value := mf;
            SasgTEMP1.Value := t;
          end;
        2: begin
            SasgBS2.Value := mf;
            SasgTEMP2.Value := t;
          end;
        3: begin
            SasgBS3.Value := mf;
            SasgTEMP3.Value := t;
          end;
        4: begin
            SasgBS4.Value := mf;
            SasgTEMP4.Value := t;
          end;
        5: begin
            SasgBS5.Value := mf;
            SasgTEMP5.Value := t;
          end;
        6: begin
            SasgBS6.Value := mf;
            SasgTEMP6.Value := t;
          end;
        7: begin
            SasgBS7.Value := mf;
            SasgTEMP7.Value := t;
          end;
        8: begin

```

```

        SasgBS8.Value := mf;
        SasgTEMP8.Value := t;
    end;
9: begin
    SasgBS9.Value := mf;
    SasgTEMP9.Value := t;
    end;
10: begin
    SasgBS10.Value := mf;
    SasgTEMP10.Value := t;
    end;
end;
Sasg.Post;
chave3 := 0;
chave2 := 0;
if (tf >= tq) then
    begin
        parada_errada := lin;
        ShowMessage('Temperatura > '+FormatFloat('##', tq)+' Temp. do Ar
Aquecido');
        Break;
    end;
    Break;
end;
end;
end;
{*****}
*** Fim de SRP3
*****}
// DO SRP3
eme[i] :=mf;
ge[i] := t;
i := i + 1;
end;
i := 1;
while (i <= camada) do
    begin
        med := med + eme[i];
        i := i + 1;
    end;
med := med/camada;
col := col + 1;
SG1.Cells[col,lin] := FormatFloat('##.00',med);
indice := Round(t1);
media[indice] := med;
col := col + 1;
if (comh = 0) then
    begin
        // calculo do decremento da altura
        delta_1 := (100 * med)/Umidade_Inicial;

        delta_1 := (100 - delta_1)/1,49235;
    end;
end;

```

```

    delta_1 := (delta_1 * Altura_Inicial)/100;
    delta_1 := Altura_Inicial - delta_1;
    altura := delta_1;
    // fim
    SG1.Cells[col,lin] := FormatFloat('##.0000',altura);
    alturax[indice] := altura;
end
else
begin
    altura := 0.00;
    SG1.Cells[col,lin] := FormatFloat('##.0000', altura);
    alturax[indice] := altura;
end;
Sasg.Edit;
SasgMEDIA.Value := med;
SasgVOLUME.Value := altura;
Sasg.Post;
if (med < mfinal) then
begin
    x := 0;
    Break;
end;
end;
t1 := t1 + 1;
i := Round(t1);
if (parada_errada <> 0) then
    i := parada_errada;
SG1.RowCount := Round(i);
case i of
    2: SG1.Height := 45;
    3: SG1.Height := 65;
    4: SG1.Height := 88;
    5: SG1.Height := 108;
    6: SG1.Height := 130;
    7: SG1.Height := 151;
    8: SG1.Height := 171;
    9: SG1.Height := 193;
else
    SG1.Height := 209;
end;
SG1.SetFocus;
end;

procedure TSasgMThompsonFixa.Edit17KeyPress(Sender: TObject;
var Key: Char);
begin
    if (Key = ',') then
        Key := '!';
end;

procedure TSasgMThompsonFixa.SpeedButton3Click(Sender: TObject);

```



```

begin
  if (camada = 3) then
    try
      SasgMThompsonFixaUrPrv.SasgMThompsonFixaUrQR1.Preview;
    except
      on EAccessViolation do
        begin
          Application.CreateForm(TSasgMThompsonFixaUrPrv,
SasgMThompsonFixaUrPrv);
          SasgMThompsonFixaUrPrv.SasgMThompsonFixaUrQR1.Preview;
        end;
      end;
    end;
  if (camada = 4) then
    try
      SasgMThompsonFixa4Prv.SasgMThompsonFixa4QR1.Preview;
    except
      on EAccessViolation do
        begin
          Application.CreateForm(TSasgMThompsonFixa4Prv, SasgMThompsonFixa4Prv);
          SasgMThompsonFixa4Prv.SasgMThompsonFixa4QR1.Preview;
        end;
      end;
    end;
  if (camada = 5) then
    try
      SasgMThompsonFixa5Prv.SasgMThompsonFixa5QR1.Preview;
    except
      on EAccessViolation do
        begin
          Application.CreateForm(TSasgMThompsonFixa5Prv, SasgMThompsonFixa5Prv);
          SasgMThompsonFixa5Prv.SasgMThompsonFixa5QR1.Preview;
        end;
      end;
    end;
  if (camada = 6) then
    try
      SasgMThompsonFixa6Prv.SasgMThompsonFixa6QR1.Preview;
    except
      on EAccessViolation do
        begin
          Application.CreateForm(TSasgMThompsonFixa6Prv, SasgMThompsonFixa6Prv);
          SasgMThompsonFixa6Prv.SasgMThompsonFixa6QR1.Preview;
        end;
      end;
    end;
  if (camada = 7) then
    try
      SasgMThompsonFixa7Prv.SasgMThompsonFixa7QR1.Preview;
    except
      on EAccessViolation do
        begin
          Application.CreateForm(TSasgMThompsonFixa7Prv, SasgMThompsonFixa7Prv);
          SasgMThompsonFixa7Prv.SasgMThompsonFixa7QR1.Preview;
        end;
      end;
    end;
end;

```

```

if (camada = 8) then
  try
    SasgMThompsonFixa8Prv.SasgMThompsonFixa8QR1.Preview;
  except
    on EAccessViolation do
      begin
        Application.CreateForm(TSasgMThompsonFixa8Prv, SasgMThompsonFixa8Prv);
        SasgMThompsonFixa8Prv.SasgMThompsonFixa8QR1.Preview;
      end;
    end;
end;
if (camada = 9) then
  try
    SasgMThompsonFixa9Prv.SasgMThompsonFixa9QR1.Preview;
  except
    on EAccessViolation do
      begin
        Application.CreateForm(TSasgMThompsonFixa9Prv, SasgMThompsonFixa9Prv);
        SasgMThompsonFixa9Prv.SasgMThompsonFixa9QR1.Preview;
      end;
    end;
end;
if (camada = 10) then
  try
    SasgMThompsonFixa10Prv.SasgMThompsonFixa10QR1.Preview;
  except
    on EAccessViolation do
      begin
        Application.CreateForm(TSasgMThompsonFixa10Prv,
SasgMThompsonFixa10Prv);
        SasgMThompsonFixa10Prv.SasgMThompsonFixa10QR1.Preview;
      end;
    end;
end;
end;

procedure TSasgMThompsonFixa.SpeedButton4Click(Sender: TObject);
begin
  if (camada = 3) then
    try
      SasgMThompsonFixaUrPrv.SasgMThompsonFixaUrQR1.Preview;
    except
      on EAccessViolation do
        begin
          Application.CreateForm(TSasgMThompsonFixaUrPrv,
SasgMThompsonFixaUrPrv);
          SasgMThompsonFixaUrPrv.SasgMThompsonFixaUrQR1.Preview;
        end;
      end;
    end;
  if (camada = 4) then
    try
      SasgMThompsonFixa4Prv.SasgMThompsonFixa4QR1.Preview;
    except
      on EAccessViolation do
        begin

```

```

if (camada = 8) then
  try
    SasgMThompsonFixa8Prv.SasgMThompsonFixa8QR1.Preview;
  except
    on EAccessViolation do
      begin
        Application.CreateForm(TSasgMThompsonFixa8Prv, SasgMThompsonFixa8Prv);
        SasgMThompsonFixa8Prv.SasgMThompsonFixa8QR1.Preview;
      end;
    end;
if (camada = 9) then
  try
    SasgMThompsonFixa9Prv.SasgMThompsonFixa9QR1.Preview;
  except
    on EAccessViolation do
      begin
        Application.CreateForm(TSasgMThompsonFixa9Prv, SasgMThompsonFixa9Prv);
        SasgMThompsonFixa9Prv.SasgMThompsonFixa9QR1.Preview;
      end;
    end;
if (camada = 10) then
  try
    SasgMThompsonFixa10Prv.SasgMThompsonFixa10QR1.Preview;
  except
    on EAccessViolation do
      begin
        Application.CreateForm(TSasgMThompsonFixa10Prv,
SasgMThompsonFixa10Prv);
        SasgMThompsonFixa10Prv.SasgMThompsonFixa10QR1.Preview;
      end;
    end;
end;

procedure TSasgMThompsonFixa.SpeedButton4Click(Sender: TObject);
begin
  if (camada = 3) then
    try
      SasgMThompsonFixaUrPrv.SasgMThompsonFixaUrQR1.Preview;
    except
      on EAccessViolation do
        begin
          Application.CreateForm(TSasgMThompsonFixaUrPrv,
SasgMThompsonFixaUrPrv);
          SasgMThompsonFixaUrPrv.SasgMThompsonFixaUrQR1.Preview;
        end;
      end;
  if (camada = 4) then
    try
      SasgMThompsonFixa4Prv.SasgMThompsonFixa4QR1.Preview;
    except
      on EAccessViolation do

```

```

        Application.CreateForm(TSasgMThompsonFixa4Prv, SasgMThompsonFixa4Prv);
        SasgMThompsonFixa4Prv.SasgMThompsonFixa4QR1.Preview;
    end;
end;
if (camada = 5) then
    try
        SasgMThompsonFixa5Prv.SasgMThompsonFixa5QR1.Preview;
    except
        on EAccessViolation do
            begin
                Application.CreateForm(TSasgMThompsonFixa5Prv, SasgMThompsonFixa5Prv);
                SasgMThompsonFixa5Prv.SasgMThompsonFixa5QR1.Preview;
            end;
        end;
    end;
if (camada = 6) then
    try
        SasgMThompsonFixa6Prv.SasgMThompsonFixa6QR1.Preview;
    except
        on EAccessViolation do
            begin
                Application.CreateForm(TSasgMThompsonFixa6Prv, SasgMThompsonFixa6Prv);
                SasgMThompsonFixa6Prv.SasgMThompsonFixa6QR1.Preview;
            end;
        end;
    end;
if (camada = 7) then
    try
        SasgMThompsonFixa7Prv.SasgMThompsonFixa7QR1.Preview;
    except
        on EAccessViolation do
            begin
                Application.CreateForm(TSasgMThompsonFixa7Prv, SasgMThompsonFixa7Prv);
                SasgMThompsonFixa7Prv.SasgMThompsonFixa7QR1.Preview;
            end;
        end;
    end;
if (camada = 8) then
    try
        SasgMThompsonFixa8Prv.SasgMThompsonFixa8QR1.Preview;
    except
        on EAccessViolation do
            begin
                Application.CreateForm(TSasgMThompsonFixa8Prv, SasgMThompsonFixa8Prv);
                SasgMThompsonFixa8Prv.SasgMThompsonFixa8QR1.Preview;
            end;
        end;
    end;
if (camada = 9) then
    try
        SasgMThompsonFixa9Prv.SasgMThompsonFixa9QR1.Preview;
    except
        on EAccessViolation do
            begin
                Application.CreateForm(TSasgMThompsonFixa9Prv, SasgMThompsonFixa9Prv);
                SasgMThompsonFixa9Prv.SasgMThompsonFixa9QR1.Preview;
            end;
        end;
    end;

```

```

        end;
    end;
    if (camada = 10) then
    try
        SasgMThompsonFixa10Prv.SasgMThompsonFixa10QR1.Preview;
    except
        on EAccessViolation do
            begin
                Application.CreateForm(TSasgMThompsonFixa10Prv,
SasgMThompsonFixa10Prv);
                SasgMThompsonFixa10Prv.SasgMThompsonFixa10QR1.Preview;
            end;
        end;
    end;
end;

procedure TSasgMThompsonFixa.SpeedButton7Click(Sender: TObject);
begin
    try
        Graf_Thompson_Fixa.Show;
    except
        on EAccessViolation do
            begin
                Application.CreateForm(TGraf_Thompson_Fixa, Graf_Thompson_Fixa);
                Graf_Thompson_Fixa.Show;
            end;
        end;
    end;
end;

procedure TSasgMThompsonFixa.SpeedButton8Click(Sender: TObject);
begin
    try
        Graf_Thompson_Fixa.Show;
    except
        on EAccessViolation do
            begin
                Application.CreateForm(TGraf_Thompson_Fixa, Graf_Thompson_Fixa);
                Graf_Thompson_Fixa.Show;
            end;
        end;
    end;
end;

procedure TSasgMThompsonFixa.SpeedButton6Click(Sender: TObject);
begin
    if (Sasg.RecordCount > 0) then
        begin
            while Sasg.RecordCount > 0 do
                begin
                    Sasg.Delete;
                    Sasg.Next;
                end;
            Sasg.Pack;
        end;
    end;
end;

```

```
Sasg.Close;  
Close;  
end;
```

```
procedure GravaDado(mf : Double; t : Double; Sasg : TPackTable; SasgBS1: TFloatField;  
SasgTEMP1: TFloatField;  
SasgBS2: TFloatField; SasgTEMP2: TFloatField; SasgBS3: TFloatField;  
SasgTEMP3: TFloatField;  
SasgBS4: TFloatField; SasgTEMP4: TFloatField; SasgBS5: TFloatField;  
SasgTEMP5: TFloatField;  
SasgBS6: TFloatField; SasgTEMP6: TFloatField; SasgBS7: TFloatField;  
SasgTEMP7: TFloatField;  
SasgBS8: TFloatField; SasgTEMP8: TFloatField; SasgBS9: TFloatField;  
SasgTEMP9: TFloatField;  
SasgBS10: TFloatField; SasgTEMP10: TFloatField);
```

```
begin
```

```
  Sasg.Edit;
```

```
  case i of
```

```
    1: begin
```

```
      SasgBS1.Value := mf;
```

```
      SasgTEMP1.Value := t;
```

```
    end;
```

```
    2: begin
```

```
      SasgBS2.Value := mf;
```

```
      SasgTEMP2.Value := t;
```

```
    end;
```

```
    3: begin
```

```
      SasgBS3.Value := mf;
```

```
      SasgTEMP3.Value := t;
```

```
    end;
```

```
    4: begin
```

```
      SasgBS4.Value := mf;
```

```
      SasgTEMP4.Value := t;
```

```
    end;
```

```
    5: begin
```

```
      SasgBS5.Value := mf;
```

```
      SasgTEMP5.Value := t;
```

```
    end;
```

```
    6: begin
```

```
      SasgBS6.Value := mf;
```

```
      SasgTEMP6.Value := t;
```

```
    end;
```

```
    7: begin
```

```
      SasgBS7.Value := mf;
```

```
      SasgTEMP7.Value := t;
```

```
    end;
```

```
    8: begin
```

```
      SasgBS8.Value := mf;
```

```
      SasgTEMP8.Value := t;
```

```
    end;
```

```
    9: begin
```

```
      SasgBS9.Value := mf;
```

```

        SasgTEMP9.Value := t;
    end;
10: begin
    SasgBS10.Value := mf;
    SasgTEMP10.Value := t;
end;
end;
end;

procedure TSasgMThompsonFixa.Edit5KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
    if (Key = ',') then
        Key := '.';
end;

procedure TSasgMThompsonFixa.Edit6KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
    if (Key = ',') then
        Key := '.';
end;

procedure TSasgMThompsonFixa.Edit7KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
    if (Key = ',') then
        Key := '.';
end;

procedure TSasgMThompsonFixa.Edit8KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
    if (Key = ',') then
        Key := '.';
    if (Key = #13) then
        begin
            trata := 0;
            palavra := '';
            palavra := Edit8.Text;
            tq := Edita(palavra);

            end;
end;

procedure TSasgMThompsonFixa.Edit14KeyPress(Sender: TObject;
var Key: Char);
begin
    if (Key = ',') then
        Key := '.';
end;

procedure TSasgMThompsonFixa.Edit15KeyPress(Sender: TObject;
var Key: Char);
begin
    if (Key = ',') then

```

```

    Key := '!';
end;

procedure TSasgMThompsonFixa.Edit16KeyPress(Sender: TObject;
var Key: Char);
begin
    if (Key = ',') then
        Key := '!';
end;

procedure TSasgMThompsonFixa.Edit18KeyPress(Sender: TObject;
var Key: Char);
begin
    if (Key = ',') then
        Key := '!';
end;

procedure TSasgMThompsonFixa.PageControl1Change(Sender: TObject);
begin
    if (PageControl1.ActivePage = TabSheet1) then
        SpeedButton2.Click
    else
        SpeedButton1.Click;
end;

procedure TSasgMThompsonFixa.com_hClick(Sender: TObject);
begin
    if (com_h.ItemIndex = 0) then
        comh := 0
    else
        comh := 1;
end;

end.

```


APÊNDICE B

(DADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS)

QUADRO 1.B - Teores de umidade experimentais e simulados dos grãos de feijão macassar pelo modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003) para secagem a temperatura de 28 °C e conteúdo de água inicial de 193% b.s.

Tempo (hora)	1ª camada		2ª camada		3ª camada		4ª camada	
	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados
0	193	193	193	193	193	193	193	193
2	171,86	176,29	194,85	193,38	197,30	192,63	194,39	192,43
4	160,94	160,46	194,22	191,92	198,53	190,92	196,40	194,42
6	144,97	144,62	192,88	190,08	203,41	190,32	197,69	195,69
8	127,14	128,20	189,64	189,63	206,33	189,70	196,67	194,68
11	102,45	100,28	190,34	192,06	205,11	190,27	178,93	192,26
14	76,52	79,83	181,26	186,46	197,38	187,29	184,89	194,09
17	63,54	65,68	167,32	173,86	187,68	186,56	195,61	194,77
20	50,42	55,43	146,68	155,79	193,79	187,84	189,06	192,58
23	43,32	47,74	115,28	134,37	192,20	190,10	191,09	190,95
26	38,14	41,83	93,78	110,22	190,94	189,24	194,99	193,50
30	33,36	35,87	74,33	81,37	185,23	183,44	196,18	196,05
34	29,02	31,43	57,64	63,39	164,89	164,72	188,32	193,08
38	23,10	28,05	46,06	51,37	133,38	136,14	183,85	194,69
45	20,36	23,84	35,84	38,16	77,83	80,12	168,54	189,35
51	18,44	21,37	29,04	31,24	53,76	56,31	120,32	144,68
57	16,92	19,57	22,59	26,60	40,03	42,69	67,36	87,40
63	16,08	18,24	22,47	23,37	32,09	34,22	44,37	60,23
69	15,41	17,23	19,78	21,06	26,86	28,65	36,29	45,06
75	14,46	16,46	17,74	19,36	23,27	24,82	30,97	35,77
81	13,56	15,87	18,32	18,09	20,74	22,12	30,62	29,71
87	13,10	15,40	17,35	17,13	20,11	20,16	26,36	25,58
93	13,07	15,02	16,60	16,39	18,66	18,70	23,37	22,68
99	13,52	14,73	16,01	15,81	17,56	17,60	21,20	20,57
105	13,54	14,49	15,56	15,36	16,72	16,76	19,60	19,02
111	14,05	14,29	15,19	15,00	16,07	16,11	18,39	17,85
117	14,57	14,13	14,90	14,71	15,55	15,59	17,47	16,95
223		14,00		14,48		15,19		16,26

QUADRO 2.B - Teores de umidade experimentais e simulados dos grãos de feijão macassar, modelo thompson para secagem a temperatura de 28 °C e conteúdo de água inicial de 193% b.s.

Tempo (hora)	1ª camada		2ª camada		3ª camada		4ª camada	
	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados
0	193,00	193,00	193,00	193,00	193,00	193,00	193,00	193,00
2	171,86	176,20	194,85	193,38	197,30	192,63	194,39	192,4
4	160,94	160,07	194,22	193,35	198,53	192,38	196,40	192,0
6	144,97	143,92	192,88	193,56	203,41	192,25	197,69	191,6
8	127,14	127,31	189,64	194,26	206,33	192,31	196,67	189,8
11	102,45	99,60	190,34	199,50	205,11	189,28	178,93	188,5
14	76,52	79,37	181,26	194,83	197,38	187,67	184,89	187,9
17	63,54	65,36	167,32	183,22	187,68	187,42	195,61	187,1
20	50,42	55,19	146,68	169,79	193,79	185,89	189,06	186,2
23	43,32	47,56	115,28	153,49	192,20	185,36	191,09	185,4
26	38,14	41,69	93,78	135,69	190,94	185,04	194,99	184,8
30	33,36	35,76	74,33	110,17	185,23	185,01	196,18	184,3
34	29,02	31,35	57,64	81,27	164,89	186,52	188,32	184,8
38	23,10	27,99	46,06	63,33	133,38	174,76	183,85	185,8
45	20,36	23,80	35,84	44,78	77,83	140,88	168,54	186,0
51	18,44	21,34	29,04	35,55	53,76	106,00	120,32	185,3
57	16,92	19,55	22,59	29,55	40,03	69,95	67,36	181,5
63	16,08	18,23	22,47	25,46	32,09	50,55	44,37	156,8
69	15,41	17,22	19,78	22,58	26,86	39,25	36,29	124,7
75	14,46	16,45	17,74	20,50	23,27	32,05	30,97	84,8
81	13,56	15,86	18,32	18,96	20,74	27,23	30,62	58,9
87	13,10	15,39	17,35	17,80	20,11	23,86	26,36	44,4
93	13,07	15,05	16,60	16,92	18,66	21,45	23,37	35,4
99	13,52	14,72	16,01	16,23	17,56	19,69	21,20	29,5
105	13,54	14,48	15,56	15,69	16,72	18,36	19,60	25,5
111	14,05	14,29	15,19	15,27	16,07	17,36	18,39	22,6
117	14,57	14,13	14,90	14,93	15,55	16,58	17,47	20,6
136		13,79		14,22		15,06		16,9

QUADRO 3.B- Dados experimentais e simulados da temperatura no interior do secador pelo modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003), quando os grãos de feijão são secos a temperatura de 28 °C e conteúdo de água inicial de 193% b.s.

Tempo (hora)	1ª camada		2ª camada		3ª camada		4ª camada	
	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados
0	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
2	22,31	23,02	22,20	23,31	21,09	23,45	21,00	23,42
4	22,63	23,16	22,56	22,45	22,52	22,63	21,02	23,4
6	22,97	23,07	21,85	22,83	22,07	22,83	21,00	22,48
8	22,20	22,85	21,78	23,02	22,21	23,06	21,01	23,07
11	22,40	22,47	22,06	22,98	21,84	23,25	21,00	23,09
14	23,84	24,35	21,97	23,03	21,59	22,68	21,00	23,3
17	24,90	25,45	22,27	22,80	21,45	22,98	21,12	22,66
20	25,58	26,15	21,19	23,09	21,88	23,15	21,14	23,12
23	26,02	26,62	20,29	22,30	20,96	23,08	21,14	23
26	26,39	26,94	24,81	21,46	21,41	22,46	21,16	23,16
30	26,38	27,24	25,95	24,08	22,10	22,47	21,91	22,83
34	26,55	27,45	26,58	25,47	21,46	23,05	21,13	23,11
38	26,73	27,59	27,24	26,27	23,09	22,99	21,99	22,64
45	26,83	27,75	27,50	27,05	24,40	24,49	22,13	22,17
51	26,89	27,84	27,63	27,41	27,84	26,13	22,50	24,53
57	27,21	27,89	27,68	27,63	25,17	26,93	22,59	26,13
63	27,24	27,92	27,69	27,75	27,55	27,32	23,45	26,86
69	27,26	27,94	27,69	27,82	27,84	27,54	26,05	27,25
75	27,27	27,96	27,84	27,87	27,65	27,68	26,88	27,48
81	27,27	27,97	27,65	27,90	27,62	27,77	28,07	27,63
87	27,27	27,97	27,62	27,92	28,09	27,83	28,17	27,73
93	27,26	27,98	27,57	27,94	27,15	27,87	28,23	27,79
99	27,25	27,98	27,52	27,95	27,95	27,90	28,28	27,84
105	27,25	27,98	27,47	27,96	27,13	27,92	28,32	27,88
111	27,23	27,99	27,44	27,97	27,86	27,94	28,34	27,9
117	27,22	27,99	27,39	27,98	27,87	27,95	28,36	27,92
123		27,99		27,98		27,96		27,65

QUADRO 4.B - Dados experimentais e simulados da temperatura no interior do secador modelo Thompson, quando os grãos de feijão são secas a temperatura de 28 °C e conteúdo de água inicial de 193% b.s.

Tempo (hora)	1ª camada		2ª camada		3ª camada		4ª camada	
	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados
0	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,0
2	22,31	22,93	22,20	23,22	21,09	23,36	21,00	23,4
4	22,63	22,96	22,56	23,2	22,52	23,37	21,02	23,5
6	22,97	22,82	21,85	23,16	22,07	23,37	21,00	23,5
8	22,20	22,56	21,78	23,07	22,21	23,35	21,01	22,5
11	22,40	22,15	22,06	23,15	21,84	22,48	21,00	22,6
14	23,84	24,04	21,97	23,05	21,59	22,72	21,00	22,7
17	24,90	25,17	22,27	22,43	21,45	22,75	21,12	22,8
20	25,58	25,89	21,19	23,27	21,88	22,95	21,14	22,9
23	26,02	26,38	20,29	23,21	20,96	23	21,14	23,0
26	26,39	26,73	24,81	23,2	21,41	23,03	21,16	23,1
30	26,38	27,05	25,95	22,72	22,10	22,98	21,91	23,1
34	26,55	27,28	26,58	23,31	21,46	22,83	21,13	23,0
38	26,73	27,44	27,24	24,84	23,09	22,28	21,99	22,9
45	26,83	27,62	27,50	26,21	24,40	22,31	22,13	22,9
51	26,89	27,73	27,63	26,81	27,84	22,98	22,50	23,0
57	27,21	27,8	27,68	27,18	25,17	24,16	22,59	22,4
63	27,24	27,85	27,69	27,41	27,55	25,68	23,45	22,5
69	27,26	27,88	27,69	27,57	27,84	26,47	26,05	23,1
75	27,27	27,91	27,84	27,68	27,65	26,95	26,88	22,8
81	27,27	27,93	27,65	27,75	27,62	27,25	28,07	25,0
87	27,27	27,94	27,62	27,81	28,09	27,45	28,17	26,1
93	27,26	27,96	27,57	27,85	27,15	27,58	28,23	26,7
99	27,25	27,96	27,52	27,88	27,95	27,68	28,28	27,1
105	27,25	27,97	27,47	27,91	27,13	27,75	28,32	27,3
111	27,23	27,98	27,44	27,93	27,86	27,81	28,34	27,5
117	27,22	27,98	27,39	27,94	27,87	27,85	28,36	27,6
136		27,99		27,97		27,92		27,8

QUADRO 5.B - Teores de umidade experimentais e simulados dos grãos de feijão macassar pelo modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003), para secagem a temperatura de 52 °C e conteúdo de água inicial de 233% b.s.

Tempo (hora)	1ª camada		2ª camada		3ª camada		4ª camada	
	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados
0	223	223	223	223	223	223	223,00	223
1	189,02	193,89	223,95	222,26	226,01	221,68	227,37	221,99
2	167,79	166,64	223,27	221,49	223,95	220,65	229,43	220,85
3	141,76	139,19	222,58	220,93	223,27	219,80	234,91	221,09
4	114,37	113,92	220,53	218,32	223,27	219,75	238,33	219,51
5	99,99	96,87	209,57	207,30	221,90	219,27	234,91	218,50
6	81,49	84,26	192,45	191,22	221,21	218,57	228,74	217,77
7	72,59	74,43	174,64	172,22	216,42	216,98	217,10	217,45
8	60,95	66,51	154,09	150,23	215,73	216,50	221,90	217,83
9	54,78	59,97	123,96	127,41	214,36	215,68	217,10	216,79
10	49,99	54,47	106,84	108,49	213,68	209,77	215,05	215,97
11	46,57	49,77	97,93	94,24	205,46	197,15	214,36	215,08
12	42,46	45,72	84,92	83,05	184,23	179,70	211,62	214,20
13	34,92	42,19	73,96	74,00	165,05	159,18	206,83	214,00
14	33,55	39,08	69,17	66,52	138,34	135,53	204,09	213,70
15	31,50	36,33	61,63	60,24	126,70	115,32	199,98	207,07
16	29,44	33,89	56,15	54,88	106,15	100,01	195,19	193,78
17	28,07	31,70	52,73	50,27	92,45	87,96	180,80	174,89
18	26,70	29,73	47,25	46,26	80,81	78,21	140,53	151,85
19	24,65	27,95	42,46	42,74	77,39	70,16	114,37	127,86
20	22,59	26,30	39,03	39,63	63,00	63,41	106,15	109,94
21	21,22	24,86	35,61	36,87	54,10	57,66	91,77	96,02
22	20,54	23,52	30,81	34,40	51,36	52,73	84,92	84,90
23	20,54	22,30	28,76	32,19	48,62	48,44	81,49	75,81
24	19,85	21,17	26,70	30,20	45,88	44,69	77,39	68,24
25	19,85	20,14	25,33	28,40	41,77	41,39	70,54	61,85
26	19,85	19,18	23,96	26,76	37,66	38,46	45,20	56,39
27	19,17	18,30	22,59	25,27	34,24	35,85	41,77	51,67
28	18,49	17,48	21,22	23,91	31,50	33,51	39,03	47,56
29	16,43	16,73	19,85	22,67	30,13	31,41	35,61	43,95
30	15,75	16,02	18,49	21,52	28,76	29,51	31,50	40,46
31	15,06	15,37	17,12	20,47	26,70	27,78	29,44	37,92
32	15,06	14,76	17,12	19,50	23,96	26,21	27,39	35,39
33	13,69	14,19	16,43	18,60	21,22	24,78	26,02	33,11
34	12,32	13,65	15,75	17,77	20,54	23,47	24,65	31,06
35	11,64	13,16	15,75	16,99	19,85	22,27	23,96	29,21
36	11,16	12,69	15,06	16,28	19,85	21,16	22,59	27,52
37	10,95	12,25	15,06	15,61	19,17	20,14	22,59	25,98
38	10,94	11,84	14,38	14,99	19,17	19,20	21,91	24,58
39	10,85	11,45	14,31	14,40	17,80	18,33	21,91	23,29
40		11,09		13,86		17,52		22,11
41		10,75		13,35		16,77		21,02
42		10,42		12,88		16,07		20,02

QUADRO 6.B - Teores de umidade experimentais e simulados dos grãos de feijão macassar pelo modelo Thompson para secagem a temperatura de 52 °C e conteúdo de água inicial de 233% b.s.

Tempo (hora)	1ª camada		2ª camada		3ª camada		4ª camada	
	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados
0	223,00	223,00	223,00	223,00	223,00	223,00	223,00	223,00
1	189,02	193,89	223,95	222,26	226,01	221,68	227,37	221,99
2	167,79	167,29	223,27	220,62	223,95	221,11	229,43	220,64
3	141,76	141,42	222,58	219,35	223,27	220,26	234,91	219,79
4	114,37	115,32	220,53	220,52	223,27	219,04	238,33	219,12
5	99,99	97,87	209,57	211,46	221,90	218,62	234,91	217,91
6	81,49	85,02	192,45	197,97	221,21	217,90	228,74	217,05
7	72,59	75,04	174,64	181,47	216,42	218,04	217,10	215,81
8	60,95	67,01	154,09	163,66	215,73	217,84	221,90	215,08
9	54,78	60,38	123,96	144,48	214,36	217,26	217,10	214,73
10	49,99	54,82	106,84	125,56	213,68	216,70	215,05	213,13
11	46,57	50,07	97,93	107,21	205,46	214,50	214,36	212,29
12	42,46	45,98	84,92	93,39	184,23	206,40	211,62	211,41
13	34,92	42,41	73,96	82,49	165,05	195,31	206,83	211,11
14	33,55	39,28	69,17	73,64	138,34	181,66	204,09	210,10
15	31,50	36,51	61,63	66,31	126,70	166,31	199,98	209,48
16	29,44	34,05	56,15	66,13	106,15	150,42	195,19	208,16
17	28,07	31,84	52,73	54,85	92,45	133,19	180,80	207,84
18	26,70	29,85	47,25	50,30	80,81	113,19	140,53	209,00
19	24,65	28,06	42,46	46,33	77,39	99,03	114,37	203,79
20	22,59	26,44	39,03	42,84	63,00	87,39	106,15	195,60
21	21,22	24,96	35,61	39,76	54,10	77,95	91,77	184,52
22	20,54	23,61	30,81	37,02	51,36	70,12	84,92	171,44
23	20,54	22,38	28,76	34,57	48,62	63,52	81,49	156,59
24	19,85	21,25	26,70	32,37	45,88	57,89	77,39	140,87
25	19,85	20,20	25,33	30,38	41,77	53,03	70,54	124,59
26	19,85	19,25	23,96	28,58	37,66	48,80	45,20	107,75
27	19,17	18,36	22,59	26,95	34,24	45,09	41,77	94,61
28	18,49	17,54	21,22	25,46	31,50	41,80	39,03	84,03
29	16,43	16,78	19,85	24,09	30,13	38,89	35,61	75,33
30	15,75	16,07	18,49	22,84	28,76	36,28	31,50	68,04
31	15,06	15,41	17,12	21,70	26,70	33,94	29,44	61,84
32	15,06	14,80	17,12	20,64	23,96	31,83	27,39	56,52
33	13,69	14,22	16,43	19,66	21,22	29,92	26,02	51,90
34	12,32	13,69	15,75	18,76	20,54	28,19	24,65	47,86
35	11,64	13,19	15,75	17,92	19,85	26,61	23,96	44,30
36	11,16	12,72	15,06	17,15	19,85	25,17	22,59	41,14
37	10,95	12,28	15,06	16,42	19,17	23,85	22,59	38,32
38	10,94	11,87	14,38	15,75	19,17	22,63	21,91	35,80
39	10,85	11,48	14,31	15,13	17,80	21,51	21,91	33,53
40		11,11		14,54		20,48		31,48
41		10,77		13,99		19,53		29,62
42		10,44		13,48		18,64		27,93
43		10,14		13		17,82		26,38
44		9,85		12,55		17,06		24,97
45		9,57		12,12		16,35		23,68
46		9,32		11,72		15,69		22,48

QUADRO 7.B - Dados experimentais e simulados da temperatura no interior do secador modelo proposto por CAVALCANTI MATA (2003) , quando as sementes de feijão são secas a temperatura de 52 °C e conteúdo de água inicial de 233% b.s.

Tempo (hora)	1ª camada		2ª camada		3ª camada		4ª camada	
	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados
0	30,88	30,88	30,88	30,88	30,88	30,88	30,88	30,88
1	30,78	31,42	30,39	31,85	30,34	31,80	28,40	32,02
2	29,50	30,92	29,82	31,25	29,94	31,38	30,80	31,42
3	28,39	29,75	28,72	30,10	28,85	30,23	32,80	31,30
4	27,55	31,16	28,56	29,93	29,29	30,70	32,60	30,28
5	36,57	37,93	29,08	30,48	29,50	30,92	30,30	30,94
6	40,17	41,66	28,86	30,25	29,06	30,46	29,30	30,65
7	42,45	44,03	29,00	30,39	28,51	29,88	28,40	30,31
8	44,03	45,66	28,14	29,49	28,39	29,75	26,90	30,70
9	45,16	46,84	28,61	29,98	28,63	30,00	26,20	29,88
10	46,01	47,72	32,28	33,83	28,97	30,36	25,90	30,39
11	46,19	48,41	36,33	38,07	28,67	30,05	25,90	30,00
12	46,72	48,96	39,10	40,98	28,33	29,69	25,70	29,60
13	47,15	49,41	41,11	43,08	28,40	29,76	25,20	30,12
14	47,49	49,77	42,61	44,65	28,01	29,35	25,80	29,59
15	47,78	50,07	43,77	45,87	31,49	33,00	24,80	29,36
16	48,53	50,33	44,70	46,85	35,31	37,00	24,60	29,77
17	48,74	50,55	45,45	47,63	38,48	40,33	23,40	29,63
18	48,92	50,74	46,07	48,28	40,60	42,55	28,32	29,68
19	49,08	50,90	46,58	48,82	42,22	44,25	29,74	31,17
20	49,21	51,04	47,01	49,27	43,48	45,57	34,43	36,08
21	49,32	51,15	47,35	49,62	44,44	46,57	37,59	39,39
22	49,41	51,24	47,62	49,91	45,17	47,34	39,82	41,73
23	49,48	51,32	47,85	50,15	45,76	47,96	41,47	43,46
24	49,55	51,39	48,03	50,34	46,24	48,46	42,73	44,78
25	49,60	51,44	48,20	50,51	46,63	48,87	43,70	45,80
26	49,65	51,49	48,34	50,66	46,97	49,22	44,48	46,62
27	49,69	51,54	48,45	50,78	47,24	49,51	45,12	47,29
28	49,73	51,58	48,56	50,89	47,48	49,76	45,65	47,84
29	49,76	51,61	48,65	50,99	47,68	49,97	46,09	48,30
30	49,79	51,64	48,73	51,07	47,86	50,16	45,48	48,68
31	49,82	51,67	48,81	51,15	48,02	50,32	45,79	49,01
32	49,84	51,69	48,86	51,21	48,16	50,47	46,06	49,30
33	49,86	51,71	48,92	51,27	48,27	50,59	46,29	49,55
34	49,88	51,73	48,98	51,33	48,39	50,71	46,49	49,76
35	50,93	51,75	49,03	51,38	48,48	50,81	46,66	49,95
36	50,95	51,77	50,91	51,42	50,39	50,90	46,82	50,12
37	52,52	51,78	51,52	51,46	50,47	50,98	46,96	50,27
38	52,54	51,80	52,02	51,49	50,54	51,05	47,09	50,41
39	52,55	51,81	52,06	51,53	51,18	51,12	47,21	50,53
40		51,82		51,56		51,18		50,63
41		51,83		51,59		51,23		50,73
42		51,84		51,61		51,28		50,82

QUADRO 8.B - Dados experimentais e simulados da temperatura no interior do secador modelo Thompson, quando as sementes de feijão são secas a temperatura de 52 °C e conteúdo de água inicial de 233% b.s.

Tempo (hora)	1ª camada		2ª camada		3ª camada		4ª camada	
	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados	Experimentais	Simulados
0	33,77	33,77	33,77	33,77	33,77	33,77	33,77	33,77
1	29,98	31,42	30,39	31,85	30,34	31,80	28,40	32,02
2	29,50	31,13	29,82	30,74	29,94	31,23	30,80	31,08
3	28,39	30,34	28,72	30,18	28,85	30,36	32,80	30,54
4	27,55	29,26	28,56	30,26	29,29	30,14	32,60	30,46
5	36,57	36,46	29,08	30,13	29,50	30,67	30,30	30,55
6	40,17	40,39	28,86	30,36	29,06	30,64	29,30	30,82
7	42,45	42,87	29,00	29,95	28,51	30,94	28,40	30,80
8	44,03	44,58	28,14	30,06	28,39	30,77	26,90	31,05
9	45,16	45,82	28,61	29,62	28,63	29,95	26,20	30,46
10	46,01	46,76	32,28	30,26	28,97	30,67	25,90	30,15
11	46,19	47,49	36,33	31,33	28,67	30,40	25,90	30,52
12	46,72	48,07	39,10	35,66	28,33	29,91	25,70	29,92
13	47,15	48,55	41,11	38,64	28,40	30,35	25,20	30,90
14	47,49	48,94	42,61	40,82	28,01	30,12	25,80	30,02
15	47,78	49,27	43,77	42,47	31,49	29,99	24,80	30,20
16	48,53	49,55	44,70	43,77	35,31	30,46	24,60	30,10
17	48,74	49,79	45,45	44,81	38,48	29,98	23,40	30,44
18	48,92	50,00	46,07	45,66	40,60	28,56	28,32	29,56
19	49,08	50,18	46,58	46,37	42,22	33,19	29,74	29,63
20	49,21	50,34	47,01	46,69	43,48	36,43	34,43	30,41
21	49,32	50,48	47,35	47,47	44,44	38,83	37,59	30,25
22	49,41	50,60	47,62	47,90	45,17	40,68	39,82	30,15
23	49,48	50,71	47,85	48,28	45,76	42,14	41,47	29,79
24	49,55	50,81	48,03	48,61	46,24	43,32	42,73	29,92
25	49,60	50,90	48,20	48,90	46,63	44,29	43,70	30,11
26	49,65	50,98	48,34	49,15	46,97	45,11	44,48	30,17
27	49,69	51,05	48,45	49,38	47,24	45,40	45,12	33,99
28	49,73	51,12	48,56	49,58	47,48	46,40	45,65	36,76
29	49,76	51,18	48,65	49,76	47,68	46,91	46,09	38,92
30	49,79	51,23	48,73	49,93	47,86	47,36	45,48	40,61
31	49,82	51,28	48,81	50,08	48,02	47,75	45,79	41,97
32	49,84	51,33	48,86	50,21	48,16	48,10	46,06	43,08
33	49,86	51,37	48,92	50,33	48,27	48,41	46,29	44,02
34	49,88	51,41	48,98	50,44	48,39	48,68	46,49	44,81
35	50,93	51,44	49,03	50,55	48,48	48,93	46,66	45,49
36	50,95	51,48	50,91	50,64	50,39	49,15	46,82	46,08
37	52,52	51,51	51,52	50,73	50,47	49,35	46,96	46,59
38	52,54	51,54	52,02	50,80	50,54	49,54	47,09	47,04
39	52,55	51,56	52,06	50,88	51,18	49,70	47,21	47,77
40		51,59		50,94		49,85		47,80
41		51,61		51,01		49,99		48,11
42		51,63		51,06		50,12		48,40
43		51,65		51,12		50,24		48,65
44		51,67		51,17		50,34		48,89
45		51,69		51,21		50,44		49,10
46		51,70		51,26		50,54		49,29

